

Análisis del Ciclo de vida de la producción de agregado grueso natural y combinación natural/reciclado en Barranquilla. Caso de Estudio

PROYECTO DE GRADO

Autor:

María Paola Acosta Mejía

Tutor:

Gilberto Martínez Arguelles

Maestría en Ingeniería Ambiental
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad del Norte
2018

CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
2.	JUSTIFICACIÓN.....	8
3.	ANTECEDENTES	10
4.	OBJETIVO GENERAL.....	17
4.1	Objetivos Específicos.....	17
5.	METODOLOGÍA.....	18
5.1	Definición del objetivo y alcance del estudio.....	18
5.2	Análisis del inventario del ciclo de vida.....	20
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	31
6.1	Evaluación de los impactos del ciclo de vida.....	31
6.2	Interpretación-Análisis de Sensibilidad.....	38
7.	CONCLUSIONES	40
8.	BIBLIOGRAFÍA	43
9.	ANEXOS	46
9.1	ANEXO A:.....	46
9.2	ANEXO B:	50
9.3	ANEXO C	53

Listado de Figuras

Figura 1: Resultados normalizados de la evaluación de impactos en la producción de agregado natural.....	33
Figura 2: Resultados normalizados de la evaluación de impactos en la producción de la combinación de natural/reciclado	34
Figura 3: Análisis de contribución para la categoría Respiratorio inorgánicos en la producción de agregado natural	34
Figura 4: Análisis de contribución para la categoría Calentamiento global en la producción de agregado natural	35
Figura 5: Análisis de contribución para la categoría Energía no renovable en la producción de agregado natural	35
Figura 6: Análisis de contribución para la categoría Respiratorio inorgánicos en la producción de la combinación de agregado natural/reciclado	36
Figura 7: Análisis de contribución para la categoría Calentamiento global en la producción de la combinación de agregado natural/reciclado	37
Figura 8: Análisis de contribución para la categoría Calentamiento global en la producción de la combinación de agregado natural/reciclado	37
Figura 9: Resultados normalizados de las categorías de daño en la producción de agregados naturales y naturales/reciclados	38
Figura 10: Relación entre la distancia de transporte de la caliza a la planta en la producción de agregados natural/reciclado y la categoría de impacto calentamiento global normalizada	39
Figura 11: Relación entre la distancia de transporte de la caliza a la planta en la producción de agregados natural/reciclado y la categoría de impacto energía no renovable normalizada	39

Listado de Ilustraciones

Ilustración 1: Fases del ACV. Adaptado de ISO 14.040.....	10
Ilustración 2: Niveles de estudio en ACV en la industria de la construcción: Preparado por el autor	11
Ilustración 3: Ubicación cantera y planta de la empresa productora de agregado natural.....	20
Ilustración 4: Proceso de producción agregados naturales	22
Ilustración 5: Ubicación planta de combinación de agregado natural/reciclado	25
Ilustración 6: Proceso de producción de la combinación de agregado natural/reciclado	27
Ilustración 7: Ejemplo de una trituradora móvil. (1 tolva de alimentación, 2 separador oscilante, 3 trituradora de mandíbula, 4 banda transportadora, 5 motor diésel) Adoptado de (Silva et al., 2017)	28
Ilustración 8: Esquema general de IMPACT 2002+. Basado en (Jolliet et al., 2003)	31

Listado de Tablas

Tabla 1: Estudios de ACV aplicados a la producción de ARC. Preparado por el autor	13
Tabla 2: Entradas proceso de extracción, agregado natural.....	23
Tabla 3: Entradas proceso de transporte hacia la volqueta, agregado natural	23
Tabla 4: Entradas procesamiento, agregado natural	24
Tabla 5: Entradas para cada proceso en la producción de 1 tonelada de agregado natural	24
Tabla 6: Entradas proceso de transporte del material a la planta, combinación de agregado natural/reciclado.....	29
Tabla 7: Entradas proceso de cargue a la trituradora, combinación de agregado natural/reciclado.....	29
Tabla 8: Entradas procesamiento, combinación de agregado natural/reciclado.....	29
Tabla 9: Entradas proceso de transporte del agregado a pilas, combinación de agregado natural/reciclado... ..	30
Tabla 10: Entradas para cada proceso en la producción de 1 tonelada de la combinación de agregado natural/reciclado	30
Tabla 11: Resultados caracterizados por categoría de impacto en la producción de agregados naturales y naturales/reciclados	32

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La construcción es uno de los sectores que más ha fortalecido la economía colombiana en los últimos años con la generación de empleo formal y de desarrollo al mejorar las condiciones de las ciudades. A pesar de los aspectos positivos de la construcción, sus impactos negativos incluyen, entre otros, el agotamiento y deterioro de la tierra, el consumo de energía, la generación de residuos sólidos, las emisiones de polvo y gases, la contaminación acústica y el consumo de recursos naturales no renovables (Lu and Yuan, 2011). Las actividades que intervienen en los procesos de construcción son las principales causas del agotamiento de los recursos naturales, que representan el 24% de la extracción a escala mundial y son también los principales generadores de residuos (Zabalza Bribián et al., 2011). Adicionalmente, se conoce que el sector de la construcción es la principal causa de las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo responsable de aproximadamente el 40-50% de las emisiones en el mundo. Los gases contaminantes que causan daños al medio ambiente se liberan en la atmósfera a lo largo de todo el proceso de construcción, incluido el transporte de materiales y la energía utilizada por las máquinas en el procesamiento y fabricación de materiales de construcción, donde este último es responsable de aproximadamente el 86% (Yan et al., 2010).

El segundo material más consumido por los seres humanos después del agua es el concreto, su consumo anual es de aproximadamente 6.500 millones de toneladas. El concreto se emplea a una gran variedad de estructuras, desde grandes terraplenes hasta edificios sofisticados; y en comparación con otros materiales de construcción metálicos, cerámicos y poliméricos, el concreto es menos costoso y posee propiedades como resistencia mecánica y durabilidad adecuadas (Blankendaal et al., 2014).

Así como el consumo en el sector de la construcción es relevante, de igual manera son los residuos que resultan de las actividades de construcción, renovación y demolición, que se les conoce como residuos de construcción y demolición (RCD). La mayor parte de los RCD terminan en los vertederos, ocupando gran espacio de ellos. Asimismo, entre los efectos adversos de estos residuos se incluye el deterioro del suelo y diversas formas de contaminación como el ruido, y la descarga de desechos tóxicos por ejemplo lixiviados (Chen and Lu, 2017). Por un lado, la disposición final de los RCD requiere una gran cantidad de tierra, y la extracción del agregado virgen destruye el ambiente ecológico local. Por otro lado, el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero durante todo su ciclo de vida son enormes. Para reducir los impactos ecológicos y ambientales y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos durante la

construcción, es necesario cambiar el modo tradicional de uso de recursos lineales (agregados-edificios-basura) en un modo circular (agregado-edificios-reutilizar / edificios con material reciclado) (Wang et al., 2017), lo que algunos han llamado economía circular (Assefa and Ambler, 2017).

Cuando la reducción y la reutilización se hacen difíciles, se debe reciclar. Tam (2008) resume que el reciclaje puede ofrecer tres beneficios: (a) reducción de la demanda de nuevos recursos; b) reducción del transporte y costo de la energía de producción; y por último (c) la utilización de residuos que de lo contrario se perderán en los vertederos.

Debido que la disposición final de RCD en vertederos no es una opción de gestión sostenible por la escasez de los mismos y por las consecuencias ambientales mencionadas anteriormente, se han desarrollado varios métodos para reciclar y reutilizar estos desechos como materiales de construcción (Hossain et al., 2016), reduciendo con ello no sólo el residuo sino la utilización de recursos no renovables. Por lo tanto, como una propuesta de solución a las amenazas ambientales de la cadena vinculada a la construcción, Vieira et al. (2016) indica la necesidad de analizar los distintos materiales de construcción por separado, centrándose en mejorar y aumentar el uso de materiales reciclables, además de evaluar alternativas de transporte y la adopción de tecnologías de construcción con bajo consumo de energía.

Los agregados reciclados de concreto (ARC) se han convertido en los últimos años, en una nueva fuente de agregados para uso en el sector de la construcción, disminuyendo así los impactos en cuanto a su disposición en los vertederos y en la extracción de materia prima no renovable. El término agregado grueso se utiliza para describir agregados mayores de 4,8 mm (Tamiz No.4), y el término agregado fino se utiliza para describir partículas menores de 4,8 mm (Vieira et al., 2016). Hay que distinguir entre agregados naturalmente redondeados y triturados, los áridos redondeados son el resultado de la intemperie y la erosión y no requieren ningún procesamiento una vez que se han recogido del mar o del lecho del río. Los áridos triturados son explotados a partir de canteras y requieren trituración mecánica (Van Den Heede and De Belie, 2012). Según Gan et al. (2016) alrededor de 9 mil millones de toneladas de agregados son extraídos y utilizados cada año en el mundo. La minería, el procesamiento y el transporte de las enormes cantidades de áridos requieren mucha energía, y a su vez producen grandes cantidades de emisiones de carbono e influyen negativamente en la ecología.

En Colombia es poca la gestión que se realiza para el manejo y uso adecuado de este tipo de residuos sólidos, sólo hasta febrero de 2017, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible a través de la resolución 472 reglamentó la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición (RCD), anteriormente únicamente en las ciudades de Bogotá y Medellín se habían desarrollado normas y planes para la re-incorporación y disposición de RCD, lo cual indica el nulo aprovechamiento que se les está proporcionando a estos residuos. Sin embargo, el uso de estos materiales reciclados puede generar otros impactos ambientales que estarían compensando o anulando los beneficios anteriormente mencionados. De acuerdo a ello, es importante comparar los beneficios ambientales y en ocasiones económicos de la utilización de dichos materiales con respecto a los convencionales.

Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología para evaluar los impactos ambientales de los procesos y productos durante todo su ciclo de vida. (Butera et al., 2015) Esta metodología se basa en la norma ISO 14040 y consta de cuatro pasos analíticos: definir el objetivo y el alcance, crear el inventario del ciclo de vida, evaluar el impacto y finalmente interpretar los resultados (Khasreen et al., 2009). Un enfoque basado en ACV identifica el uso de energía, insumos y desechos generados a partir del momento de la obtención de un producto hasta la disposición final del mismo. Cuando se evalúa en su totalidad el ciclo de vida de un producto o proceso se garantiza que la minimización del impacto en una sola etapa no crea consecuentemente más impacto en otra (Blankendaal et al., 2014). En la literatura son pocas las investigaciones que se han desarrollado con respecto a ACV aplicados a la producción de agregados tanto naturales como reciclados de concreto y en todos los desarrollados hasta el momento presentan resultados favorables de desempeño ambiental para el proceso productivo de los agregados reciclados, sin embargo, en todos se resalta la importancia de las distancias y el transporte en el ciclo para evitar el aumento de los impactos de este tipo de material innovador (Rosado et al. (2017), Estanqueiro et al. (2016), Hossain et al. (2016), Faleschini et al. (2016), Gan et al. (2016), Blengini and Garbarino (2010). En el país y en la ciudad de Barranquilla, aún no hay documentación científica que analice los impactos ambientales que se derivan de la producción de agregados reciclados de concreto, debido a la poca importancia que se le ha proporcionado al aprovechamiento de este tipo de residuos.

Por tanto, este proyecto se plantea el siguiente interrogante, el cual motiva la investigación: ¿Cuáles son los impactos ambientales surgidos del análisis del ciclo de vida de la producción de agregado grueso natural y la combinación de natural con reciclado en la ciudad de Barranquilla?

2. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años el sector de la construcción en Colombia ha sido el de mayor crecimiento. Según el DANE, el valor agregado de la construcción en el PIB aumentó 3.3% en el cuarto trimestre del 2016 con respecto al mismo periodo para el 2015, siendo uno de los grandes contribuyentes al fortalecimiento de la economía colombiana. En particular, la construcción de vivienda de interés social y las autopistas 4G representan la estrategia más importante para el estado en cuanto a la generación de empleo.

Al ser un sector muy dinámico, la construcción, es la fuente principal de residuos sólidos de materiales de producción, lo cual constituye un alto consumo de energía y materia prima. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en Colombia, la industria de la construcción, consume el 40% de la energía, genera el 30% del CO₂, el 40% de los residuos y consume el 60% de los materiales extraídos de la tierra. Adicionalmente, en la construcción se desperdicia el 20% de todos los materiales empleados en la obra. Asimismo, en el país se producen más de 22 millones de toneladas de RCD.

El concreto, es el material más utilizado por la construcción y está constituido de una mezcla de diferentes cantidades de cemento Portland, agregados gruesos, agregados finos, agua, aditivos y adiciones minerales. Cuando el cemento se hidrata forma una pasta resistente que se une a los fragmentos agregados, formando un material monolítico (Vieira et al., 2016). El concreto, de acuerdo a sus propiedades es un producto que puede reutilizar sus propios desechos como materia prima para la producción de agregados y de nuevos concretos.

Los agregados naturales o reciclados (gruesos y finos) representan aproximadamente el 70% del volumen de concreto (Estanqueiro et al., 2016). La extracción de los agregados naturales causa diferentes impactos ambientales como, por ejemplo, erosión, contaminación del aire y del agua, modificación del paisaje, vibraciones y ruido.

Con el objetivo de satisfacer la demanda de concreto a nivel mundial se estarían necesitando billones de cantidades de arena, grava o roca triturada, lo cual reduciría considerablemente las reservas naturales de estos recursos no renovables. Según Tošić et al. (2015) el consumo global anual de agregados es alrededor de 15 billones de toneladas.

Por su parte, los agregados reciclados se presentan como una alternativa valiosa ya que podrían utilizarse para aplicaciones en función de su calidad, es decir, para el relleno y la rehabilitación de canteras y rellenos sanitarios agotados, en obras viales como material sub-base, como lecho granular o material filtrante para capas de drenaje y en la producción de concreto (por ejemplo, pilares de puentes, obras de protección en tierra), y aplicaciones de alto grado (por ejemplo, elementos prefabricados). (Faleschini et al., 2016) (Marinković et al., 2010).

La reutilización de los RCD conlleva a muchas ventajas ambientales, económicas y sociales debido que se reduce el consumo de energía, las emisiones de CO₂ y la producción de residuos, lo que disminuye el uso de vertederos y rellenos sanitarios, restringiendo el paso de contaminantes al suelo y a las aguas subterráneas, evitando malos olores y con ello, posibles riesgos de salud pública. (Braga et al., 2017)

La producción sostenible, no necesariamente implica mayor producción y mayores utilidades para la empresa, sino que promueve el uso eficiente de los recursos no renovables y su sustitución a través de la utilización de material reciclado que puede ser incorporado a la misma cadena de producción o en su defecto a otras que requieran de dicho insumo o material alternativo. Sin embargo, es importante que los impactos ambientales de estas nuevas cadenas de producción se evalúen cuantitativa y cualitativamente con el objetivo de tomar decisiones acertadas para la incorporación de nuevos materiales. Colombia, al ser un país relativamente joven en temas de aprovechamiento de estos residuos, podría ser prometedor la implementación de la metodología de análisis del ciclo de vida que permita analizar los impactos ambientales de la producción de agregados reciclados de concreto, debido que, si resulta positivo, fomentaría la generación de empresas gestoras de ARC, así como una estrategia productiva para las personas víctimas del conflicto y reinsertados. Adicionalmente, es una línea de investigación que no ha sido abordada ni aplicada al contexto colombiano ni local, por lo tanto, se estaría generando nuevo conocimiento.

3. ANTECEDENTES

Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología para evaluar los impactos ambientales potenciales de un producto o un sistema mediante la contabilización de los intercambios ambientales (emisiones, consumo de reactivos y energía) durante todo el ciclo de vida del producto, servicio o sistema. (Butera et al., 2015) La característica única y principal de ACV es el enfoque en los productos desde una perspectiva de ciclo de vida. El alcance global de ACV es útil para evitar el desplazamiento de problemas, por ejemplo, de una fase del ciclo de vida a otra, de una región a otra, o de un problema medioambiental a otro (Finnveden et al., 2009).

ACV es una herramienta metodológica que desde hace varios años se viene aplicando en el proceso de optimización de los sistemas de manejo ambiental de los productos. El análisis del ciclo de vida se desarrolla en cuatro fases de acuerdo a la norma ISO 14.040 (*Ilustración 1*):

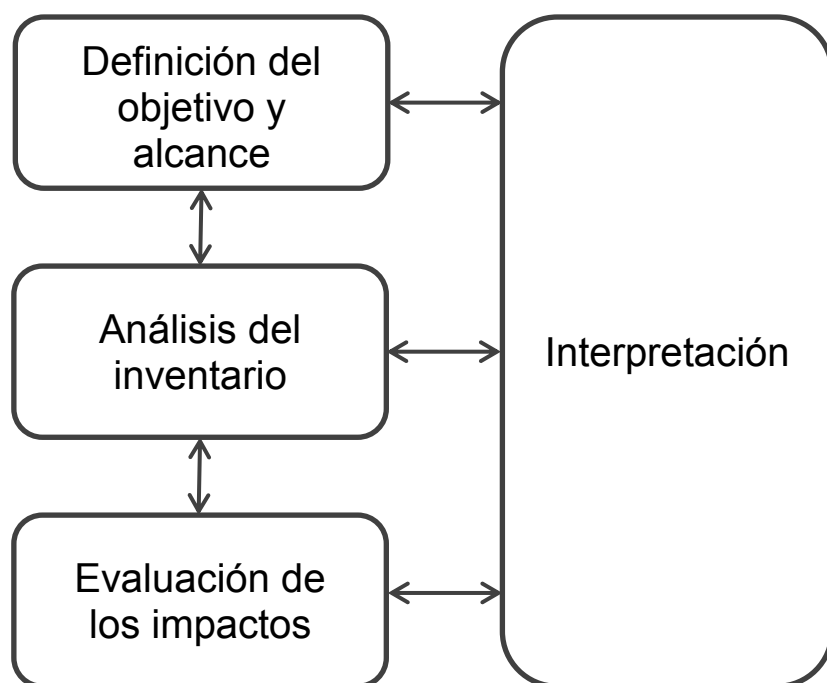


Ilustración 1: Fases del ACV. Adaptado de ISO 14.040

- **Definición del Objetivo y alcance del estudio (The Goal and Scope Definition)** es la fase metodológica del ACV en el que se definen la unidad de comparación del estudio, las fronteras y las fases del proceso de producción que se incluirán en el estudio y análisis, el tipo de datos requeridos, así como la fuente de los mismos (Vieira et al., 2016, Finnveden et al., 2009).

En la industria de la construcción, los estudios de ACV se pueden realizar a 3 diferentes niveles del sistema representados en la **Ilustración 2**.

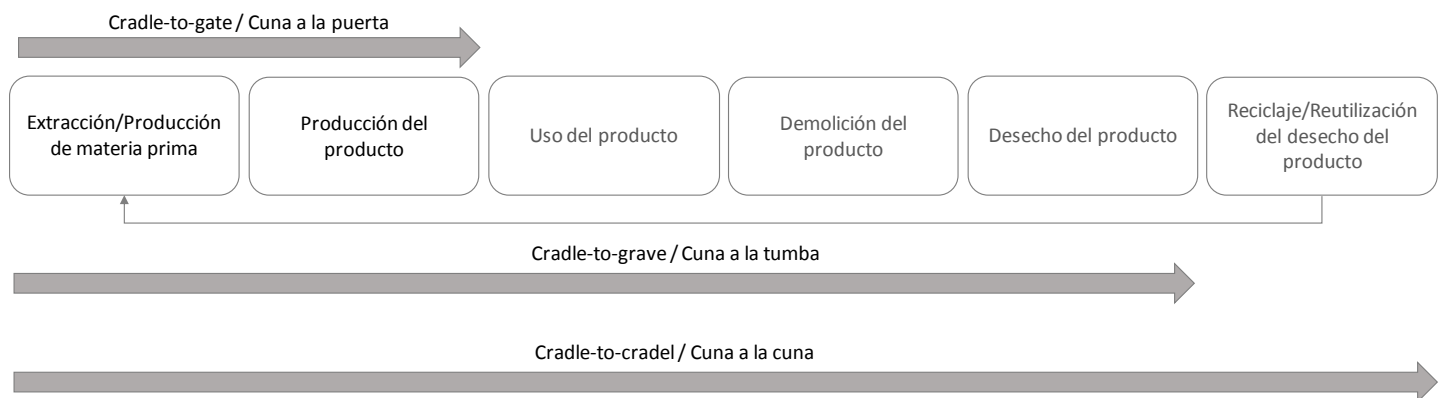


Ilustración 2: Niveles de estudio en ACV en la industria de la construcción: Preparado por el autor

Análisis del inventario del ciclo de vida (LCI-Life Cycle Inventory Analysis) en el LCI se indican y cuantifican las entradas (consumo de energía, de agua, de recursos renovables y de no renovables) y salidas (emisiones de contaminantes en el agua, en el aire y de residuos sólidos) de cada una de las fases del proceso, incluyendo la recopilación de la información y el análisis de los datos concernientes al sistema de producción. (Vieira et al., 2016, Finnveden et al., 2009). Esta información puede ser recopilada a través de las bases de datos que ya existen en la literatura o por medio de encuestas a empresas y personas relacionadas con el proceso que se esté analizando. Este es uno de las fases más relevantes dentro de un análisis del ciclo de vida, debido que la información que obtengo debe ser veraz y ajustada a al sistema de acuerdo a las características y condiciones que lo rodean.

- **Evaluación de los impactos del ciclo de vida (LCIA-Life Cycle Impact Assessment)** se analizan y evalúan los impactos resultado de cada proceso del ciclo en base a dos métodos, orientado a problemas u orientado a daños y tiene como objetivo comprender y evaluar la magnitud

y la importancia de los posibles impactos ambientales del sistema estudiado. (Vieira et al., 2016, Finnveden et al., 2009).

En el enfoque de punto medio (problema orientado), todos los materiales de la LCI son debidamente combinados en categorías de impacto de acuerdo con una característica común de la relación causa-efecto, mientras que en el enfoque de punto final (damage oriented) aborda los daños como resultados del cambio climático, que se conecta a las categorías de impacto en el punto medio y describe un modelo que caracteriza la gravedad de los daños ambientales causados por el LCI. (Vieira et al., 2016)

- **Interpretación** los resultados de las fases anteriores se evalúan en relación con el objetivo y alcance con el fin de llegar a conclusiones y recomendaciones (Finnveden et al., 2009).

A continuación, se presentan las investigaciones relacionadas con la evaluación de los impactos ambientales de la producción de agregados provenientes de residuos de concreto teniendo en cuenta que hasta la fecha sólo se encontraron 7 artículos cuyos datos concernientes a las diferentes etapas del LCA se relacionan en la . Sin embargo, se mencionan también aquellas investigaciones que dentro de su proceso de evaluación tienen en cuenta la contribución de los agregados (natural y/o reciclado) en el resultado final del análisis.

Referencia	Lugar	Tipo de agregado	Unidad de medida	Fronteras del Sistema	Fuente del Inventario	Evaluación de Impactos
(Rosado et al., 2017)	Brasil	Naturales y reciclados mixtos	1 t	Natural: "Cradle-to-Site" Mixto: "Gate-to-Site"	Ecoinvent v.3.01 EU & DK Input Output. US LCI Datos específicos de empresa de estudio	Sima Pro Impact 2002+
(Estanqueiro et al., 2016)	Portugal	Naturales y reciclados de concreto	1 t	"Cradle-to-Site"	Datos específicos de empresas de estudio	Sima Pro CML Baseline 2000 Ecoindicator 99 Cumulative Energy Demand Sima Pro Impact 2002+
(Hossain et al., 2016)	Hong Kong	Naturales y reciclados de concreto	1 t	"Cradle-to-Site"	CLP y CLCD de China, ELCD de Europa. Datos específicos de empresas de estudio	Sima Pro Impact 2002+
(Faleschini et al., 2016)	Vicenza, Italia	Naturales y reciclados de concreto	1 t	"Cradle-to-Gate")	Datos específicos de empresa de estudio	CML 2002
(Gan et al., 2016)	Hong Kong	Naturales y reciclados de concreto	1 Kg	"Cradle-to-Site")	Datos específicos de empresa de estudio	Impact 2002+

(Simion et al., 2013)	Italia	Naturales y reciclados de concreto	1 t	Natural: "Cradle-to-Site" Reciclado: "Gate-to-Gate"	BUWAL 250 Ecoinvent	Sima Pro Eco-Indicator 99, EDIP/UMIP, Cumulative Energy Demand Impact 2002+*
(Blengini and Garbarino, 2010)	Turin, Italia	Reciclados de RCD	1 t	Vertedero evitado recolección, reciclaje, transporte, y extracción de canteras evitada	Base de datos local, encuestas y base de datos Ecoinvent 2.0.	

Tabla 1: Estudios de ACV aplicados a la producción de ARC. Preparado por el autor

Rosado et al. (2017) evaluó el impacto ambiental de la producción de agregados naturales y mixtos reciclados para su uso como material de base y sub-base en pavimentación de carreteras en Brasil. De acuerdo a los resultados presentados, la mayoría de las categorías de impacto analizadas son mejores en términos ambientales para los reciclados mixtos que para los naturales, a excepción de la categoría no cancerígeno.

Por el contrario, Estanqueiro et al. (2016) analiza a través de un ACV la producción de agregados reciclados, comparando los impactos ambientales del uso de agregados naturales o reciclados en la producción de concreto en tres escenarios posibles (con agregados naturales, con agregados reciclados producidos en una planta fija y agregados reciclados producidos en una planta móvil). Para el análisis, tiene en cuenta los impactos asociados al transporte, al relleno sanitario del material que en la planta no es aprovechable. Utiliza tres métodos de evaluación, Ecoindicator 99, CML Baseline 2000, y Cumulative Energy Demand, concluyendo en términos generales que el uso de agregados reciclados no es más favorable que el de los naturales. En el estudio se realiza un análisis de sensibilidad para conocer los escenarios y las condiciones que favorecerían el uso en términos ambientales de agregados reciclados.

De igual manera, Hossain et al. (2016) estudió los impactos generados en la producción de agregados naturales y reciclados procedentes de RCD tanto finos como gruesos y los resultados del ACV muestran que aproximadamente 51% de los impactos ambientales totales se pueden evitar a partir de la fabricación de agregados reciclados gruesos comparado con los provenientes de fuentes naturales. Las categorías de impacto en las que los agregados reciclados presentan un mejor desempeño son radiación ionizante, ecotoxicidad acuática y terrestre, potencial de calentamiento global y energía no renovable. Adicionalmente, se resalta que el transporte es el proceso responsable del mayor consumo de energía, alrededor del 70%. Para el estudio, se cuantificaron los impactos evitados por la disposición de los residuos en vertederos o rellenos sanitarios.

De acuerdo a los resultados presentados por Blengini and Garbarino (2010), 13 indicadores de 14 mostraron que los impactos evitados son mayores que los impactos inducidos por la colección y el reciclaje de 1 tonelada de residuos de construcción y demolición en la Provincia di Torino en el norte de Italia. La fase que contempla evitar el uso de rellenos sanitarios para disponer los residuos de demolición y de construcción, siempre muestra el mayor crédito ambiental en todos los indicadores. Sin embargo, si las fases de evitar los vertederos y el transporte son excluidas del análisis, el equilibrio entre los impactos inducidos y evitados en la cadena de reciclaje no siempre es favorable al reciclaje. Por otra parte, como innovación, utiliza un Sistema de Información Geográfica (GIS) para determinar las distancias entre las minas y las plantas de reciclaje ubicadas en la Provincia di Torino, con el objetivo de obtener información más real y precisa para el estudio.

Por otra parte, también en Italia, Faleschini et al. (2016) estudia a través de LCA los impactos ambientales asociados a la producción de agregados naturales y reciclados (de alta y baja calidad) en una planta estacionaria de tamaño mediano en la región de Vicenza en la que se realizan actividades de extracción de agregados naturales y reciclado de residuos de construcción y demolición. En esta investigación, a diferencia de Blengini and Garbarino (2010), no se tuvo en cuenta las fases que evitan la utilización de vertederos y la extracción de agregado natural. Los resultados de este estudio indican que las plantas integradas, donde coexisten las cadenas productivas de agregados naturales y agregados reciclados, pueden promover la sostenibilidad, ya que las interacciones existentes entre las dos cadenas productivas permitirían reducir las cargas ambientales asociadas con las actividades de inicio de una planta. Adicionalmente, con respecto a los agregados de alta y baja calidad, la producción de reciclados presenta menores emisiones que la de naturales.

Gan et al. (2016) presenta un análisis del ciclo de vida de agregados naturales, agregados reciclados y agregados importados, y lo combina con el método analítico de optimización multi-objetivo con la finalidad de minimizar los daños ambientales y el costo de los materiales asociados con la oferta de agregados, teniendo en cuenta la capacidad de suministro de cada tipo de agregado, cumpliendo con las demandas y los objetivos de reducción de emisiones atmosféricas en Hong Kong. Los estudios muestran que el uso de áridos reciclados puede minimizar tanto los objetivos medioambientales como de costo, debido que en todas las categorías de impacto estudiadas (calentamiento global, acidificación terrestre y efectos respiratorios), la producción de agregados

reciclados presentó menor número de emisiones de los principales contaminantes (CO_2 , SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$), siendo los procesos en los que había consumo de energía y de combustibles fósiles los de mayor relevancia.

De igual manera, Simion et al. (2013) evalúa los impactos ambientales del proceso de producción de agregados naturales y agregados reciclados, a través de tres métodos distintos: Ecoindicator 99, Cumulative Energy Demand y EDIP/UMIP, concluyendo, que los agregados reciclados presentan menores impactos ambientales que los naturales, representado en el 30%, 40% y 17% respectivamente para cada método empleado con respecto a los efectos generados por los naturales.

Ding et al. (2016) describe cómo es la producción de agregados a partir de residuos de concreto provenientes de demoliciones y de construcciones y estudia el impacto ambiental de la sustitución en diferentes proporciones del agregado natural por agregado grueso reciclado en las mezclas de concreto en China. Asimismo provee la fuente de los datos en los procedimientos de este proceso, resaltando que una de las diferencias en la evaluación en cuanto al proceso entre agregados naturales y agregados reciclados, son las largas distancias que usualmente existen entre las minas o canteras y la planta de producción de concreto. Lo anterior, debido que estas minas, por lo general se encuentran en áreas remotas a las zonas urbanas y grandes ciudades, por fuera de su perímetro y en regiones de montaña, por lo tanto la distancia es aproximadamente en promedio de 100 km. Ding et al. (2016) concluye que la contribución ambiental de la producción de agregados en los resultados del LCA del concreto convencional y del concreto con un porcentaje de RCA es similar y muy pequeño. Serres et al. (2016) también realiza un análisis ambiental comparativo entre concreto hecho a base de agregados naturales, agregados reciclados y una mezcla entre los dos, utilizando LCA, resultando que las muestras de concreto con material reciclado presentan el mejor comportamiento ambiental en gran parte de las categorías de impacto. Asimismo, el impacto ambiental del concreto reciclado (donde parte del agregado natural es reemplazado por el agregado reciclado obtenido a partir de concreto residual) se reduce a aproximadamente el 88% (pero sólo al 96% con respecto a las emisiones de CO_2) de los impactos correspondientes al concreto convencional (Turk et al., 2015).

Por lo contrario, en los resultados del LCA del estudio desarrollado por Marinković et al. (2010) la fase de producción de agregados es ligeramente mayor para concretos reciclados que para concretos convencionales. Los impactos ambientales totales en términos de uso de energía, calentamiento global, eutrofización, acidificación y creación de oxidantes fotoquímicos dependen de las

distancias y tipos de transporte. De igual manera, López Gayarre et al. (2016), evalúa el análisis del ciclo de vida de los bordillos de concreto fabricados con agregados naturales y reciclados obtenidos tanto en plantas fijas como móviles, concluyendo que las emisiones del uso de agregado natural son menores a las del reciclado y adicionalmente manifiesta que las plantas de reciclaje estacionarias producen menos contaminación que las plantas móviles.

Desde otra perspectiva, Butera et al., (2015) realiza un análisis comparativo a través de LCA, en el que evalúa el desempeño ambiental de dos posibles escenarios para los residuos de demolición y de construcción en especial el concreto (reutilizarlo como material en construcciones de vías o disponerlo en el relleno sanitario) y determina que el reciclaje de este residuo es preferible en la mayoría de las categorías de impacto ambiental con respecto al otro escenario. A su vez, recomienda distancias menores de 40 km para asegurar un ahorro general. De la misma manera, se puede mencionar que López Gayarre et al. (2016), destacaron que, si se desea reducir las emisiones producto del consumo de combustible, el transporte del material agregado se debe realizar en camiones con una capacidad de 25 toneladas.

De acuerdo a la revisión del estado del arte realizada, es importante destacar que gran parte de la información contenida en los inventarios para el análisis del ciclo de vida de los softwares más utilizados en el mundo provienen de datos basados y ajustados a las actividades desarrolladas en los países de Europa, lo cual dificulta el análisis y aplicación de estas bases de datos en zonas con características diferentes al viejo continente, como por ejemplo Colombia, por consiguiente es importante recolectar datos ajustados a la realidad del país, relacionada principalmente a la producción, transporte y distancias.

Con respecto a los 7 estudios analizados, es posible concluir que en términos generales todos presentan resultados favorables de desempeño ambiental para el proceso productivo de los agregados reciclados, sin embargo, en todos se resalta la importancia de controlar y disminuir las distancias recorridas en el transporte de materia prima o de producto terminado dentro de las fronteras del ciclo para evitar el aumento de los impactos ambientales de los agregados reciclados. Adicionalmente, se presenta la necesidad de estandarizar cómo aplicar el marco del análisis del ciclo de vida, para analizar los impactos ambientales de la producción de estos agregados, con el fin de poder comparar los resultados de diferentes estudios de casos. También es importante tener en cuenta cómo integrar factores tales como la ubicación en zonas montañosas o llanas y las características generales de la red de carreteras.

4. OBJETIVO GENERAL

Determinar los impactos ambientales de la producción de agregado grueso natural y combinación de natural con reciclado en Barranquilla, a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, enfoque de la cuna a la puerta.

4.1 Objetivos Específicos

- Elaborar una revisión del estado del conocimiento del desempeño en términos ambientales de los ARC por medio del enfoque del análisis del ciclo.
- Recopilar la información concerniente a las entradas y salidas para cada proceso, identificando las etapas, flujos de materia y energía, equipos y procedimientos.
- Determinar y analizar los impactos más significativos en la cadena de producción de agregado natural y la combinación de natural/reciclados, por medio de un ACV.
- Comparar los impactos surgidos en la producción de agregados naturales/reciclados con respecto a los derivados de los agregados naturales, de acuerdo a sus características.

5. METODOLOGÍA

Con el fin de lograr el cumplimiento de los objetivos planteados, se utilizó metodología del Análisis del Ciclo de Vida indicado en la norma ISO 14040 e ISO 14044. La cual define 4 etapas que fueron aplicadas a dos casos de estudio en el Departamento del Atlántico para cada tipo de agregado: natural y combinación de natural con reciclado.

5.1 Definición del objetivo y alcance del estudio

A través del siguiente estudio se pretende analizar los impactos ambientales surgidos de la producción de agregado grueso convencional y la combinación de natural/reciclado con la finalidad de conocer los posibles impactos y brindar información precisa a las empresas para que puedan optimizar los procesos y con ello reducir los impactos ambientales. Asimismo, se busca realizar un inventario de las entradas y salidas de la producción de agregado grueso de la región, con la información directa de empresas formales representativas en el Caribe Colombiano.

Para el estudio de la producción de agregado grueso convencional sólo se incluirán las etapas de extracción, el transporte de la materia prima hacia la planta y el procesamiento de esta para producir el agregado. Con respecto a la combinación de agregado natural con reciclado, se tendrán en cuenta el transporte de los residuos y de la piedra natural hacia la planta y el manejo y procesamiento del material y del agregado.

La unidad funcional del estudio para ambos tipos de agregados será 1 tonelada de agregado grueso natural de 4.8 – 38 mm que se utilizan básicamente en la producción de concreto, mezclas asfálticas, pavimentación de carreteras, base para adoquines, etc; y el agregado natural/reciclado en la construcción de terraplenes, base y sub-base. El método de evaluación de los impactos fue IMPACT 2002+, por lo que es una metodología que combina dos enfoques de modelación del daño producido por las actividades involucradas en el análisis desde un estado medio hacia uno final y se ha utilizado en la literatura en otras investigaciones similares (Rosado et al., 2017, Hossain et al., 2016, Gan et al., 2016, Blengini and Garbarino, 2010). Esta metodología incorpora las siguientes categorías de impacto de estado medio: toxicidad humana, efectos respiratorios, radiación ionizante, agotamiento de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad terrestre, eutrofización acuática, eutrofización terrestre, ocupación de tierra, calentamiento global, energía no renovable y

extracción mineral. A través de estas categorías, los resultados del inventario son relacionados con cuatro categorías de daño final: salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos (Jolliet et al., 2003). El análisis del ciclo de vida fue modelado en el software SimaPro 8.4.0, que es uno de los software comerciales más utilizados en el mundo para realizar un ACV, debido a su flexibilidad para modelar cualquier tipo de proceso, porque no está relacionado con una única actividad o industria. Adicionalmente, este software posee una gran base de datos, alimentada con información de diferentes países y regiones, generalmente de Europa, pero permite importar datos y ajustar algunos procesos al ámbito local. Finalmente, SimaPro tiene el mayor número de métodos de evaluación de impactos que cualquier otro software con similares características (Seto et al., 2017).

La información del proceso de producción para ambos agregados se obtuvo a través de visitas y entrevistas (por medio de cuestionarios) realizadas a tres empresas productoras de estos agregados, con el objetivo de recopilar datos específicos y de primera mano que se ajustaran a la realidad del sector en el ámbito local. Sin embargo, la obtención de la información representó un desafío importante en esta investigación, debido a ciertos obstáculos que se presentaron al momento de solicitar a las empresas la autorización para ingresar y utilizar datos internos de sus procesos, así como las restricciones encontradas por los métodos de trabajo y la forma en qué están organizados. Por otra parte, en la ciudad de Barranquilla ni en la Región Caribe existe una empresa que produzca agregados reciclados proveniente de residuos de concreto de forma continua, por lo tanto, era necesario acudir a las únicas organizaciones que lo hacen en Colombia y que se encuentran en otras ciudades como Bogotá y Medellín. Desafortunadamente no se obtuvo respuesta y adicional a ello, no era conveniente establecer una comparación con la producción de agregados naturales, al estar en zonas geográficas con diferentes condiciones y procesos regulatorios.

Las limitaciones antes mencionadas, no permitieron recopilar toda la información necesaria para el estudio, por consiguiente se complementó con las bases de datos Ecoinvent v3.0 y US LCI.

5.2 Análisis del inventario del ciclo de vida

Caso de estudio 1: Producción de agregado grueso natural

El título minero 10429 está localizado en cercanía al corregimiento de Arroyo de Piedra, municipio de Luruaco, Atlántico, en el km 66 de la vía la Cordialidad sentido Barranquilla-Cartagena (*Ilustración 3*). Se explotan agregados para la construcción tipo calizas fosilíferas que son utilizadas en mezclas de concreto, materiales de base y sub-base y tiene una extensión de 580.8 ha de las cuales 150 ha son de interés.

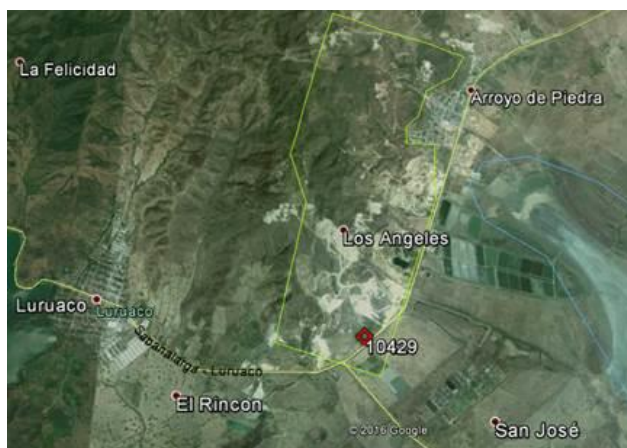


Ilustración 3: Ubicación cantera y planta de la empresa productora de agregado natural

La empresa produce en promedio 140 toneladas/hora de grava, trabajando 14 horas al día durante 25 días al mes.

El proceso de extracción de la caliza se realiza con un martillo hidráulico que perfora la roca. Por restricciones de la autoridad ambiental no se utilizan explosivos en este tipo de actividades en el departamento del Atlántico. La roca extraída es cargada a una volqueta de 25 toneladas por medio de una excavadora con una capacidad de carga de 3.5 m³. La distancia promedio desde la cantera hacia la planta de beneficio es de 1.5 km.

Inicialmente la caliza ingresa a la tolva de alimentación y entra a una alimentadora que hace pasar la roca por una trituradora primaria de mandíbula, luego, a través de bandas transportadoras, la caliza triturada es llevada hacia una criba primaria por el que se separa de la línea a todas las partículas menores de 1/4" correspondiente al polvillo. Después, se pasa el material por una trituradora secundaria de cono y finalmente por medio de una criba secundaria de 3 niveles

se separan las partículas de acuerdo al tamaño predeterminado. Aquellas que cumplen se pasan por un tornillo lavador y aquellas mayores a 1" se recirculan nuevamente al cono triturador. Todos los equipos de la planta de beneficio funcionan con energía eléctrica proveniente de la empresa comercializadora Electricaribe. Algunos de estos equipos consumen lubricantes de diferentes tipos que han sido correlacionados, al igual que el consumo eléctrico, de acuerdo a la unidad funcional definida para el estudio.

El consumo de agua de la planta es de 5.000 m³ al mes y esta proviene de cuerpos de agua superficiales en una finca cercana. El agua se recircula, por lo cual sólo existe un 20% de desperdicio. Los detalles del proceso se muestran en forma de diagrama de flujo en la **Ilustración 4**.

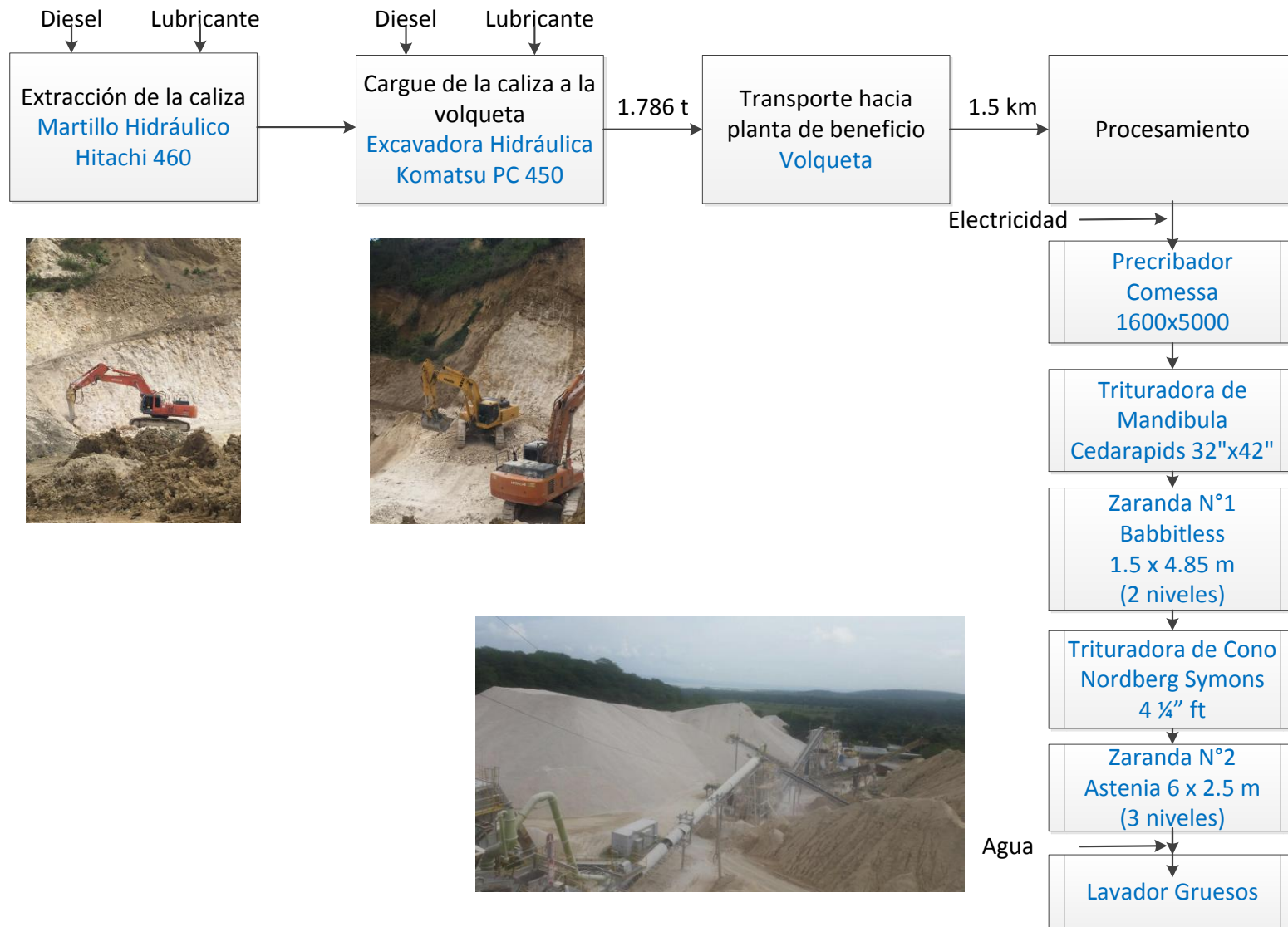


Ilustración 4: Proceso de producción agregados naturales

Para la recolección de la información directa de las entradas e insumos del proceso de producción de agregados naturales se diseñó un cuestionario (Anexo A) teniendo en cuenta las consideraciones encontradas en la literatura. Las **Tabla 2 a 4**, detallan la información obtenida:

- **Proceso de Extracción**

Maquinaria	Marca	Capacidad de producción	Tipo de Combustible	Consumo de combustible	Tipo de lubricante	Consumo de lubricante
Martillo Hidráulico	Hitachi 460	25 t/h	Diesel	26 gal/h	Aceite de Motor	0,132kg/h
					Aceite Hidráulico	0,0726kg/h
					Grasa	0,14 kg/h

Tabla 2: Entradas proceso de extracción, agregado grueso natural

- **Transporte hacia la volqueta**

Maquinaria	Marca	Capacidad de producción	Tipo de Combustible	Consumo de combustible	Tipo de lubricante	Consumo de lubricante
Excavadora Hidráulica	Komatsu PC 450	3.5 m ³ (5.5t)	Diesel	26 gal/h	Aceite de Motor	0,132kg/h
					Aceite Hidráulico	0,0726kg/h
					Grasa	0,14 kg/h

Tabla 3: Entradas proceso de transporte hacia la volqueta, agregado grueso natural

- **Procesamiento**

Maquinaria	Cantidad	Modelo	Potencia (kW)
Precribador	1	Comessa 1600x5000	15
Trituradora de Mandíbula	1	Cedarapids 32x42	111,5
Zaranda N°1	1	Telesmith 6x20	29,9
Trituradora de Cono	1	Nordberg Symons 4-1/4' ft	160
Zaranda N°2	1	Astenia 6x2.5m	22

Bandas Transportadoras	7		$5.6 \times 7 = 39,2$
Lavador Gruesos	1		88
Total			465,6

Tabla 4: Entradas procesamiento, agregado grueso natural

Como la producción por hora de grava de la planta es de 140 toneladas, para obtener el consumo por hora para 1 tonelada, se divide el consumo total por hora 465,6 sobre la producción, siendo 3,32 kwh/t. Sin embargo, de acuerdo con Coelho and de Brito (2013), los equipos no funcionan continuamente, debido a mantenimiento o esperas de material, por ello, se calcula que el verdadero consumo es del 70% de su capacidad total, es decir 2,33 kwh/t.

De acuerdo a la información anterior, se definen las cargas de cada proceso para 1 tonelada de agregado grueso natural producido (Tabla 5).

Proceso	Caliza (t)	Diésel (gal)	Lubricante (kg)	Electricidad (kWh)	Agua (m ³)	Distancia (t.km)
Extracción de la caliza	1,786	1,85	0,02	-	-	-
Transporte de la caliza a la volqueta	-	1,85	0,02	-	-	-
Transporte hacia la planta de beneficio	-	-	-	-	-	2,679
Procesamiento	-	-	0,0007	2,33	0,10	-

Tabla 5: Entradas para cada proceso en la producción de 1 tonelada de agregado grueso natural

Caso de estudio 2: Producción de la combinación de agregado natural/reciclado

En la Región Caribe no existe una planta de trituración que tenga una producción continua de agregado grueso a partir de residuos de concreto. Sin embargo, empresas de construcción están empezando a aprovechar y a integrar este tipo de residuos a sus propios proyectos, lo cual demuestra el interés de las empresas por implementar proceso de reciclaje y de economía circular. En este caso, la planta de estudio se encuentra en la ciudad de Barranquilla, en la avenida del Río Magdalena, al suroriente de la ciudad (**Ilustración 5**).

Para la presente investigación, se asumió una producción de 50t/hora en promedio de material granular para la construcción de terraplenes y bases y sub-bases para vías. La empresa sólo tiene 10 meses produciendo esta clase de agregado y al ser utilizado únicamente en sus proyectos de construcción, la producción presenta muchas variaciones. Por lo tanto, se estableció un escenario en condiciones normales de trabajo.

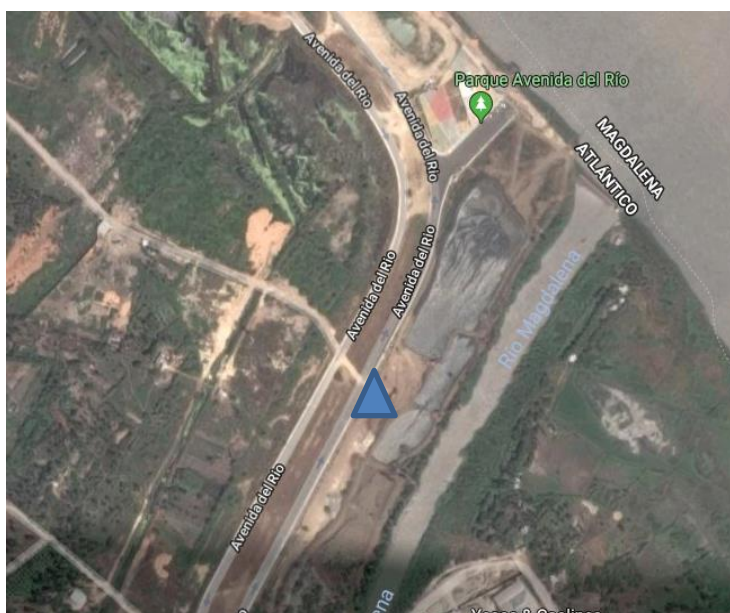


Ilustración 5: Ubicación planta de combinación de agregado natural/reciclado

El material que llega a la planta en volquetas (la piedra caliza por lo general de la cantera Sello Rojo en el municipio de Puerto Colombia a 20 km aproximadamente y el residuo de concreto de la vía 40 para este estudio, a una distancia de 6 km) es inspeccionado y separado de acuerdo a sus características de manera visual por los operarios. En la planta se labora 8 horas al día, durante 6 días a la semana. El producto final se constituye por 70% de piedra caliza y 30% de residuo de concreto. Estas piedras son cargadas a la trituradora móvil a través de una retroexcavadora hidráulica.

La trituradora móvil tiene integrado un separador magnético para las barras de acero. Los residuos que ingresan a la planta por lo general no vienen acompañados de mucho acero, por lo tanto, la cantidad de acero retirado del proceso no es relevante para la investigación. Finalmente, el material es organizado en pilas por medio de una cargadora. Adicionalmente, a través de una zaranda fija se obtiene grava de 2" que también es utilizado por la empresa en sus proyectos. La **Ilustración 6** resume el proceso de triturado incluyendo todos los flujos del sistema. Para el análisis, son consideradas las cargas ambientales y los impactos evitados por el reemplazo de material no renovable y del envío del residuo a los vertederos.

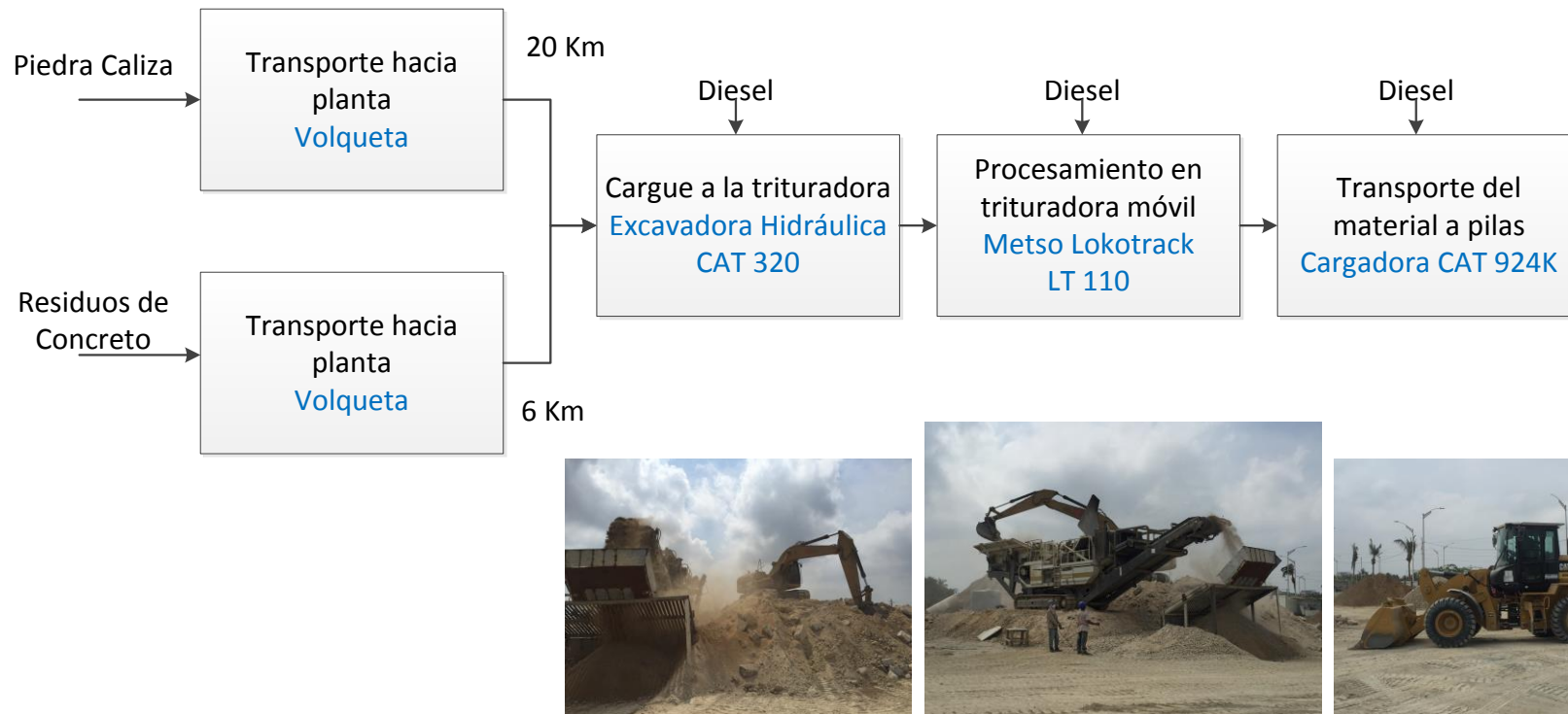


Ilustración 6: Proceso de producción de la combinación de agregado natural/reciclado

Las plantas de reciclaje de RCD no son muy diferentes de las plantas que producen agregados naturales. Estas pueden utilizar varias trituradoras, clasificadoras, equipos de transferencia y dispositivos para eliminar contaminantes, con el objetivo de fabricar un material granular de tamaño específico y con la calidad necesaria para ser utilizado en el sector de la construcción. (Silva et al., 2017). Las plantas de reciclaje pueden ser estacionarias o móviles. Las plantas estacionarias usualmente adoptan tecnologías de alto nivel y poseen típicamente equipos de clasificación para la separación de material no deseado. Las plantas semi-móviles están compuestas por unidades móviles separadas (alimentación, trituración, separación magnética y tamizado) que se colocan permanentemente en un centro de reciclaje. Las plantas móviles trituran cantidades menores de RCD que las estacionarias, en sitios de demolición temporal con tecnologías básicas y producen típicamente agregados reciclados de baja calidad (Blengini and Garbarino, 2010). Las plantas móviles usualmente están compuestas por una trituradora y un mecanismo de clasificación (**Ilustración 7**), con baja efectividad en la remoción de contaminantes.

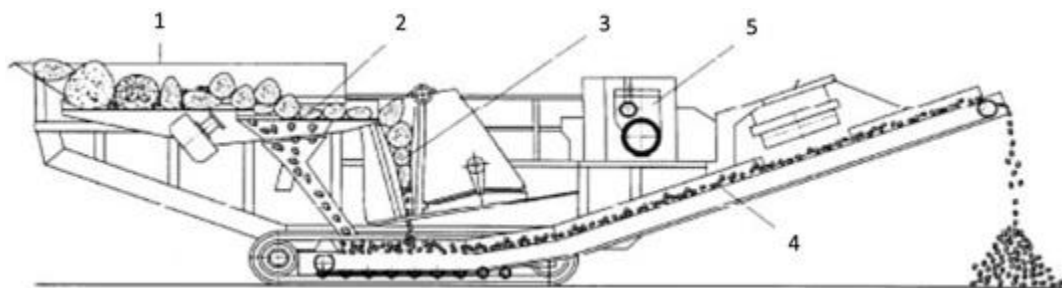


Ilustración 7: Ejemplo de una trituradora móvil. (1 tolva de alimentación, 2 separador oscilante, 3 trituradora de mandíbula, 4 banda transportadora, 5 motor diésel) Adoptado de (Silva et al., 2017)

Para el caso de estudio, la empresa posee una planta móvil que no es trasladada hacia el lugar de la demolición, sino que se encuentra permanentemente en la planta de aprovechamiento.

Para la recolección de la información directa de las entradas e insumos del proceso de producción se diseñó un cuestionario (Anexo B). A continuación, se detalla la información obtenida (**Tabla 6 a 9**):

- **Transporte del material a la planta**

Material	Origen	Distancia	Vehículo
Piedra Caliza	Cantera Sello Rojo	20 km	Volqueta
Residuos de Concreto	Vía 40	6 km	Volqueta

Tabla 6: Entradas proceso de transporte del material a la planta, combinación de agregado natural/reciclado

- **Cargue a la trituradora**

Maquinaria	Marca	Tipo de Combustible	Consumo de combustible
Excavadora Hidráulica	CAT 320	Diésel	4.1gal/h

Tabla 7: Entradas proceso de cargue a la trituradora, combinación de agregado natural/reciclado

- **Procesamiento en trituradora móvil**

Maquinaria	Marca	Tipo de Combustible	Consumo de combustible
Trituradora Móvil de Impacto	Metso Lokotrack LT 110	Diésel	5.1gal/h

Tabla 8: Entradas procesamiento, combinación de agregado natural/reciclado

- Transporte del agregado a pilas para almacenamiento

Maquinaria	Marca	Tipo de Combustible	Consumo de combustible
Cargadora de ruedas	CAT 924K	Diésel	3.8gal/h

Tabla 9: Entradas proceso de transporte del agregado a pilas, combinación de agregado natural/reciclado

De acuerdo a la información anterior, se definen las cargas de cada proceso para 1 tonelada de agregado natural/reciclado de material para base y sub-base.(Tabla 10)

Proceso	Diésel (gal)	Distancia (t.km)
Transporte de la caliza hacia la planta	-	20
Transporte de los residuos de concreto hacia la planta	-	1.26
Cargue a la trituradora	0.082	-
Procesamiento	0.102(14MJ)	-
Transporte del material a las pilas de almacenamiento	0.076	-

Tabla 10: Entradas para cada proceso en la producción de 1 tonelada de la combinación de agregado natural/reciclado

La información anterior fue ingresada en el software SimaPro, teniendo como referencia los procesos y las bases de datos utilizados por (Rosado et al., 2017). (Ver Anexo C)

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 Evaluación de los impactos del ciclo de vida

El método de evaluación IMPACT 2002+, es un método que surge de la combinación de metodologías como Ecoindicator 99, CML, IPCC y propone una implementación factible de un enfoque combinado en efectos desde un estado medio y de daño, vinculando todos los tipos de resultados del inventario del ciclo de vida a través de 15 categorías de estado medio y 4 de daño en la cadena de causa-efecto (Jolliet et al., 2003)

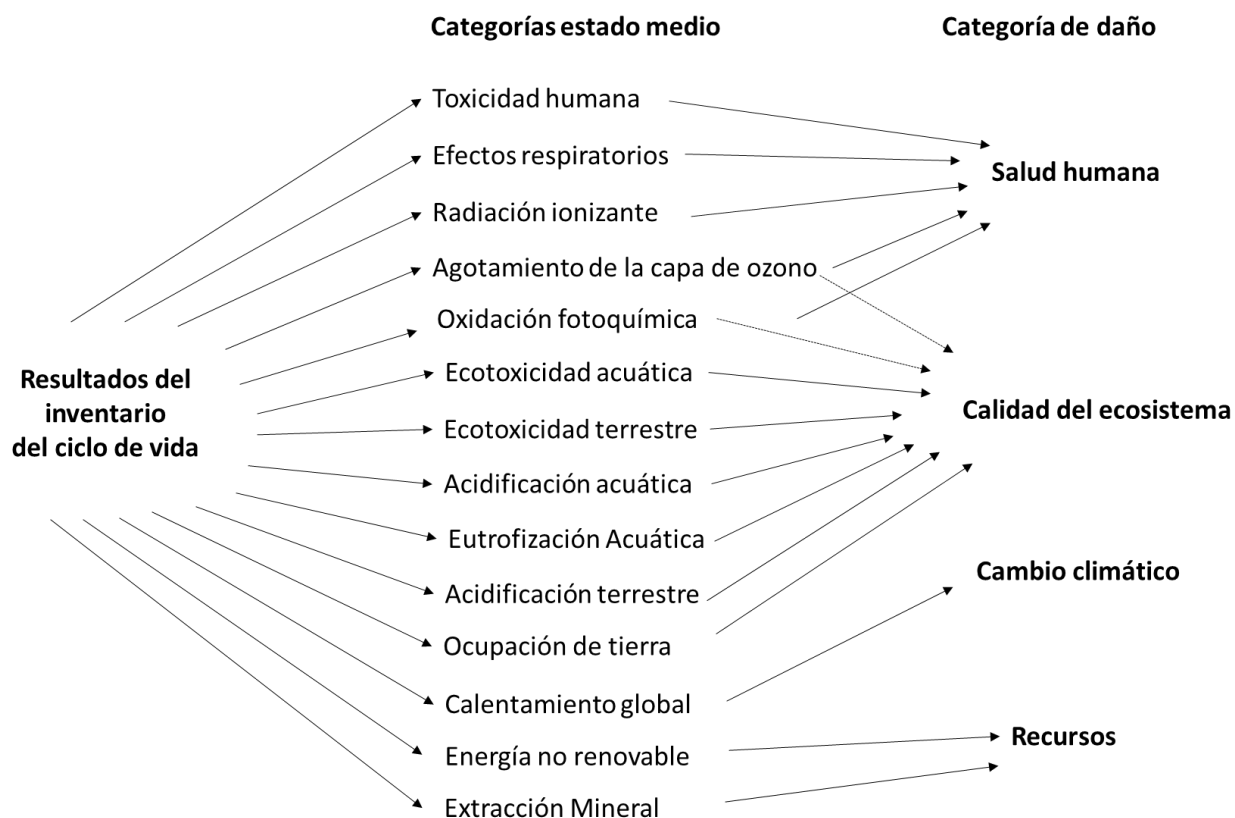


Ilustración 8: Esquema general de IMPACT 2002+. Basado en (Jolliet et al., 2003)

Toxicidad humana se divide en Carcinógenos y No Carcinógenos.

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización por categoría de impacto para ambos procesos productivos:

Categoría de impacto	Unidad	Naturales	Naturales/Reciclados
Carcinógenos	kg C ₂ H ₃ Cl eq	0.183	0.017
No carcinógenos	kg C ₂ H ₃ Cl eq	2.431	0.274
Respiratorio orgánicos	kg PM _{2.5} eq	0.082	0.007
Radiación ionizante	Bq C-14 eq	4.172	10.884
Agotamiento capa de ozono	kg CFC-11 eq	0.000	0.000
Respiratorio orgánicos	kg C ₂ H ₄ eq	0.020	0.002
Ecotoxicidad acuática	kg TEG water	16163.752	1681.487
Ecotoxicidad terrestre	kg TEG soil	43.684	240.553
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	3.404	0.283
Ocupación de tierra	m ² org.arable	3.540	-0.029
Acidificación acuática	kg SO ₂ eq	0.477	0.042
Eutrofización acuática	kg PO ₄ P-lim	0.000	0.000
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	35.579	5.444
Energía no renovable	MJ primary	529.915	68.200
Extracción mineral	MJ surplus	0.011	0.037

Tabla 11: Resultados caracterizados por categoría de impacto en la producción de agregados naturales y naturales/reciclados

De acuerdo a los resultados anteriores se puede evidenciar que la producción de material granular para bases y sub bases, con una proporción de 30% de residuos de concreto integrados al proceso, presenta un mejor desempeño en términos ambientales en 11 de las 15 categorías de impacto que la producción de agregados naturales, debido a que la producción de este tipo de agregados requiere menos procesos que el natural y tiene en cuenta los impactos evitados por el reciclaje. Sin embargo, no es posible establecer una comparación directa, sino sólo presentar un posible panorama, por lo que el producto final de ambos procesos no tiene el mismo uso y calidad.

Con el fin de realizar una evaluación a través de diferentes indicadores y discutir la importancia relativa entre diferentes áreas de impacto, así como analizar la cuota respectiva de cada impacto al daño global, los resultados se normalizaron a los impactos per cápita anuales de un ciudadano europeo según la metodología IMPACT 2002+ (por ejemplo: el número de persona equivalente afectada durante un año). Resultados presentados en la **Figura 1** y **Figura 2** muestran que los valores normalizados más altos pertenecen a tres categorías (respiratorio inorgánicos, calentamiento global y energía no renovable) en ambos procesos, y particularmente en la producción de la combinación de agregados naturales/reciclados la categoría de ecotoxicidad terrestre.

En la producción de agregados naturales, de acuerdo al análisis de contribución de cada proceso, se puede concluir que para las categorías de Respiratorio inorgánicos (**Figura 3**) y Calentamiento Global (**Figura 4**), el 89% y 84% de los impactos es debido a la combustión del diésel en equipo industrial respectivamente. Es decir en las máquinas utilizadas en el proceso de extracción como el martillo hidráulico y la retroexcavadora. El diésel es uno de los combustibles que más generan material particulado menor de 2.5 micras, y son los responsables de gran parte de la contaminación que se crea en obras por el uso de equipos de construcción causando enfermedades respiratorias en la población cercana. Asimismo, el diésel contiene más azufre que la gasolina común, lo cual se transforma con el tiempo en PM 2.5.

Con respecto al Calentamiento global al ser el diésel un combustible fósil, la mayor contribución se realiza por medio de las emisiones de dióxido de carbono durante la combustión en el vehículo. Adicionalmente, la generación de material particulado, también aumenta el calentamiento global, ya que estas partículas absorben una mayor cantidad de calor.

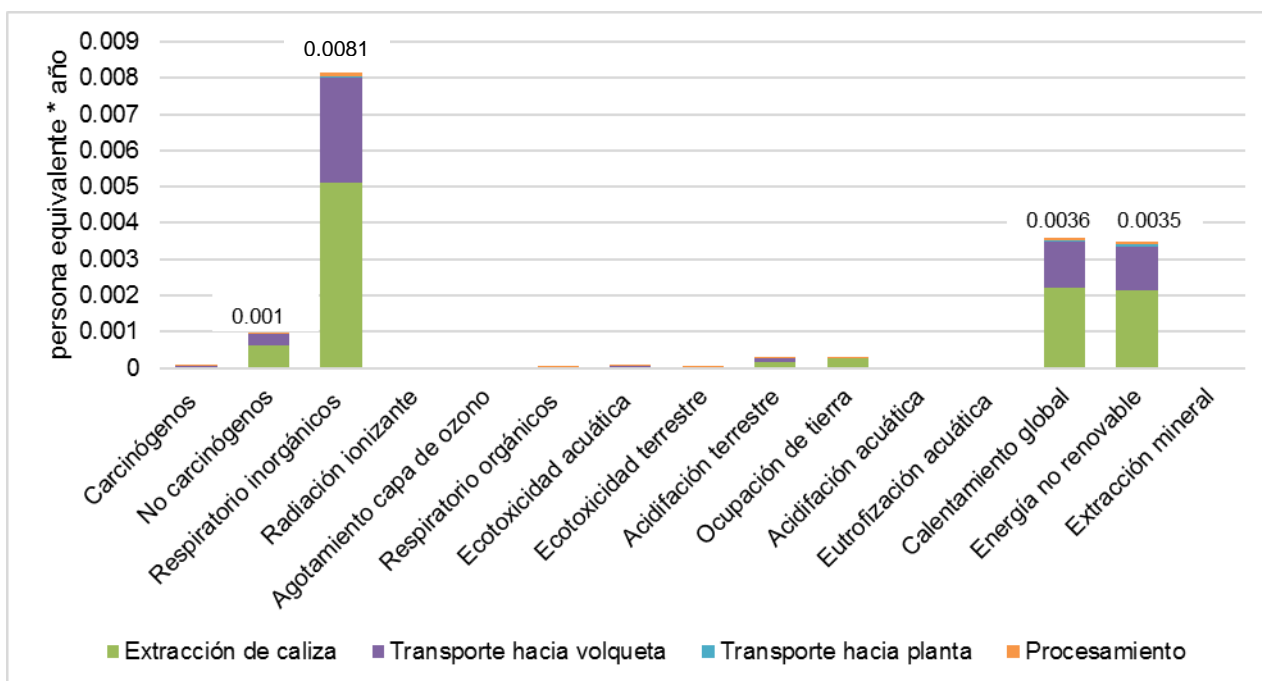


Figura 1: Resultados normalizados de la evaluación de impactos en la producción de agregado natural

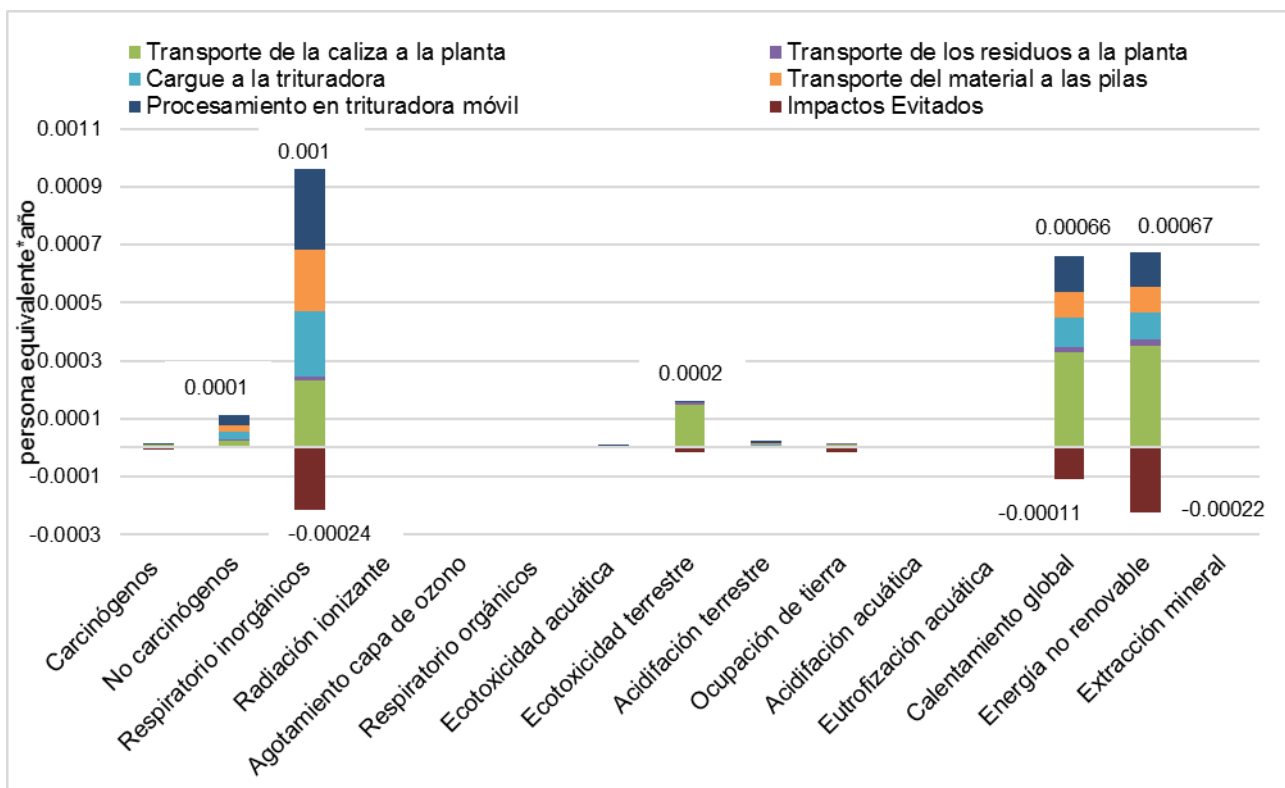


Figura 2: Resultados normalizados de la evaluación de impactos en la producción de la combinación de natural/reciclado

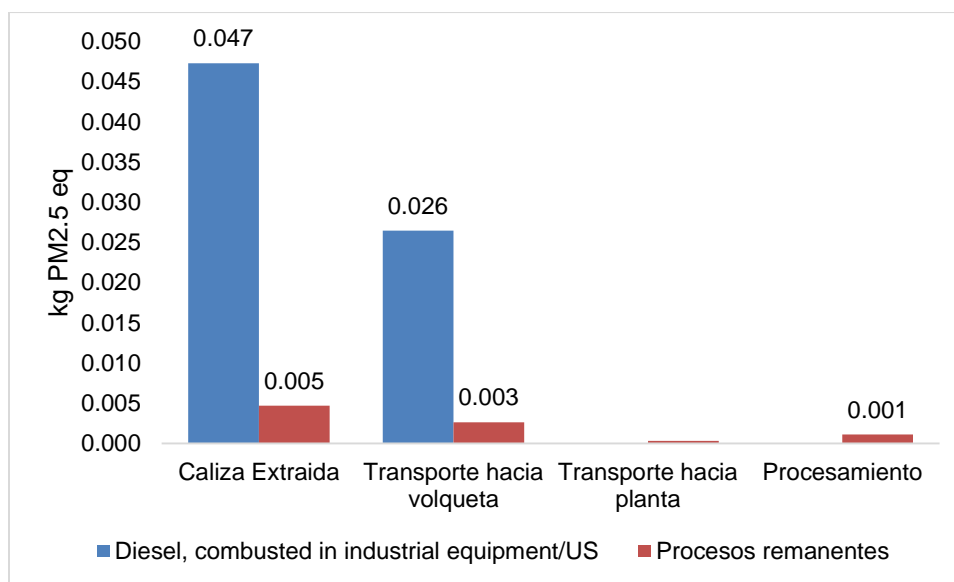


Figura 3: Análisis de contribución para la categoría Respiratorio inorgánicos en la producción de agregado natural

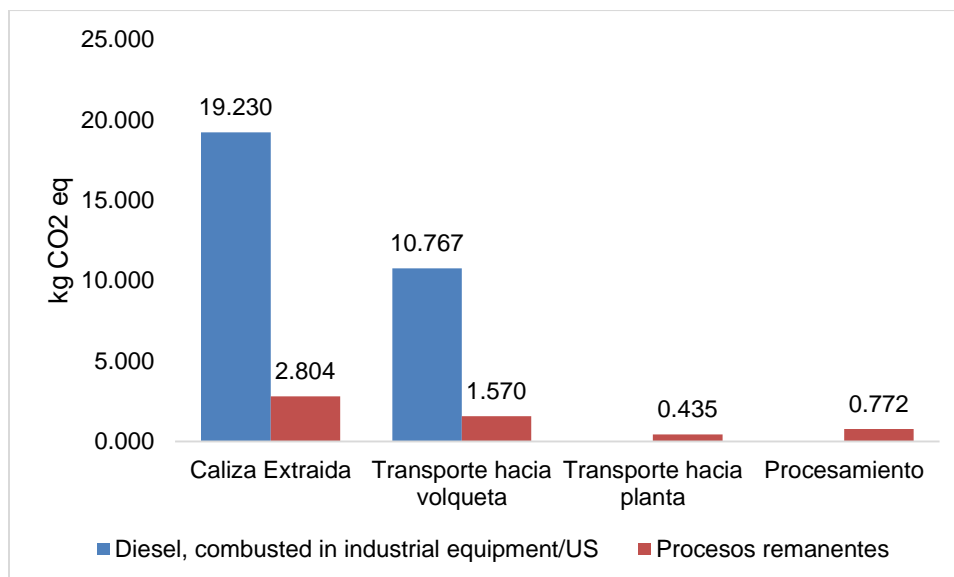


Figura 4: Análisis de contribución para la categoría Calentamiento global en la producción de agregado natural

Por otra parte, en la categoría de Energía no renovable (**Figura 5**) la mayor contribución (89%) es por parte de la producción del diésel, que proviene del petróleo y que en este caso es la fuente primaria de energía extraída con mayor participación a nivel mundial (Jaime et al., 2013).

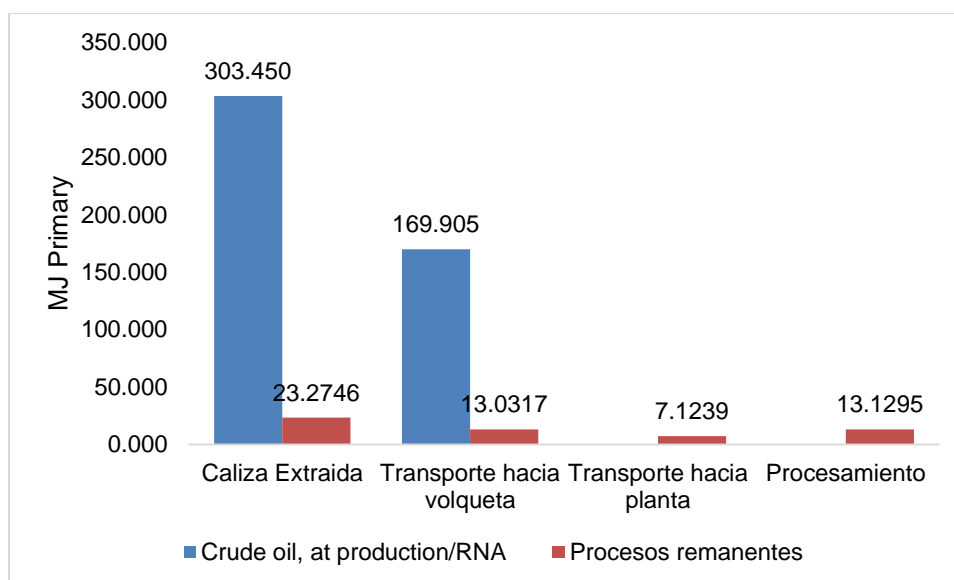


Figura 5: Análisis de contribución para la categoría Energía no renovable en la producción de agregado natural

Para el caso de la combinación del agregado natural/reciclado, se observa de igual manera que la combustión del diésel que se presenta en la maquinaria pesada de construcción, así como en la trituradora móvil y en el transporte de la caliza a la planta, es el de mayor recorrido en este caso, es el proceso con mayor contribución en respiratorio inorgánicos con 90% (**Figura 6**). Por el contrario en calentamiento global (**Figura 7**), ecotoxicidad terrestre y energía no renovable (**Figura 8**) el proceso con mayor contribución es el transporte de la caliza hacia la planta, que cubre una distancia de aproximadamente 20 km, lo cual permite inferir que los kilómetros recorridos, son un parámetro y aspecto relevante en la carga ambiental para la producción de agregados de este tipo. Lo anterior debido que en la producción de agregados naturales la distancia recorrida en el transporte de la materia prima hacia la planta de beneficio es muy corta (1.5km), y es por ello que toda la carga ambiental se concentró en el consumo de la maquinaria de extracción.

Los resultados anteriormente descritos coinciden con los de (Rosado et al., 2017), quien responsabiliza al consumo del diésel como el mayor aspecto que impacta de forma significativa el desempeño ambiental de la producción de agregados.

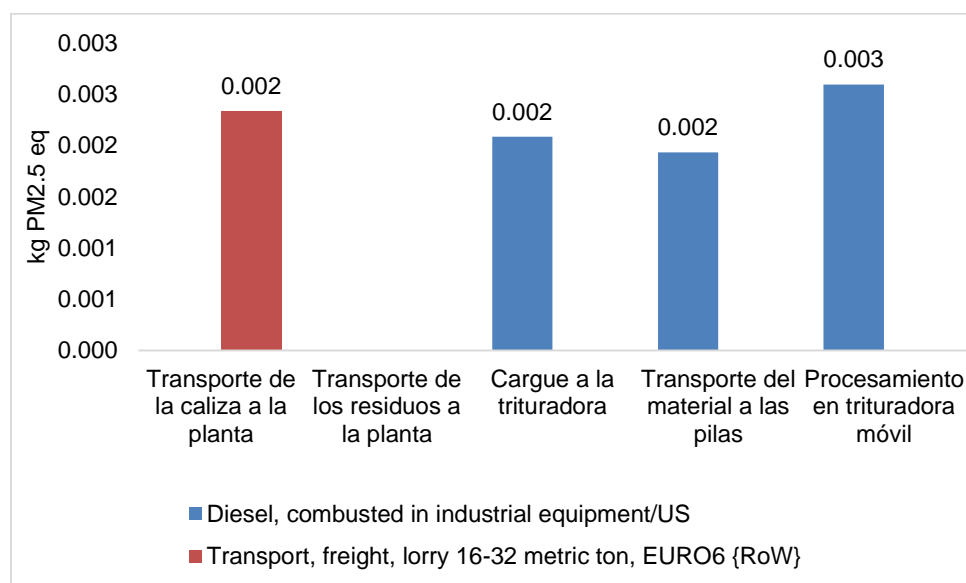


Figura 6: Análisis de contribución para la categoría Respiratorio inorgánicos en la producción de la combinación de agregado natural/reciclado

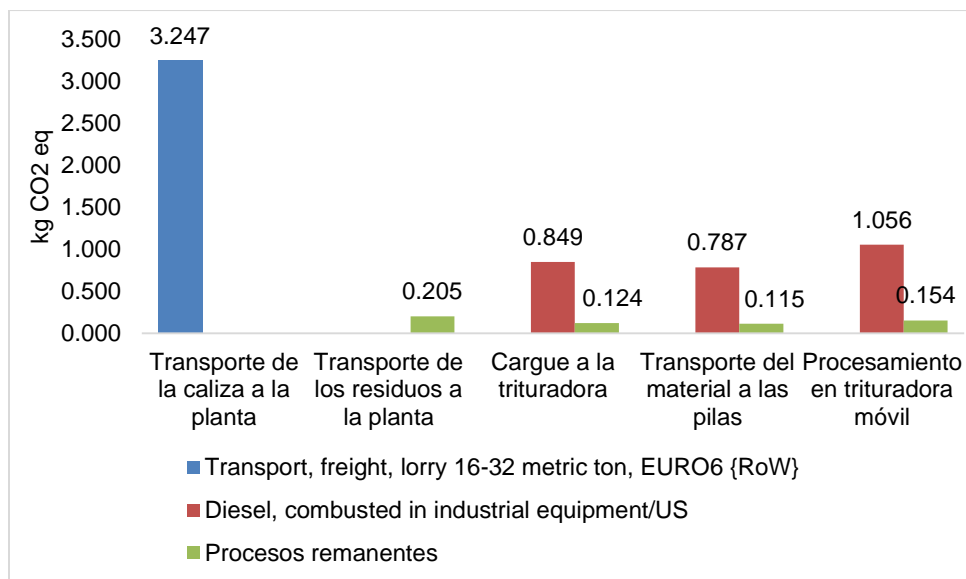


Figura 7: Análisis de contribución para la categoría Calentamiento global en la producción de la combinación de agregado natural/reciclado

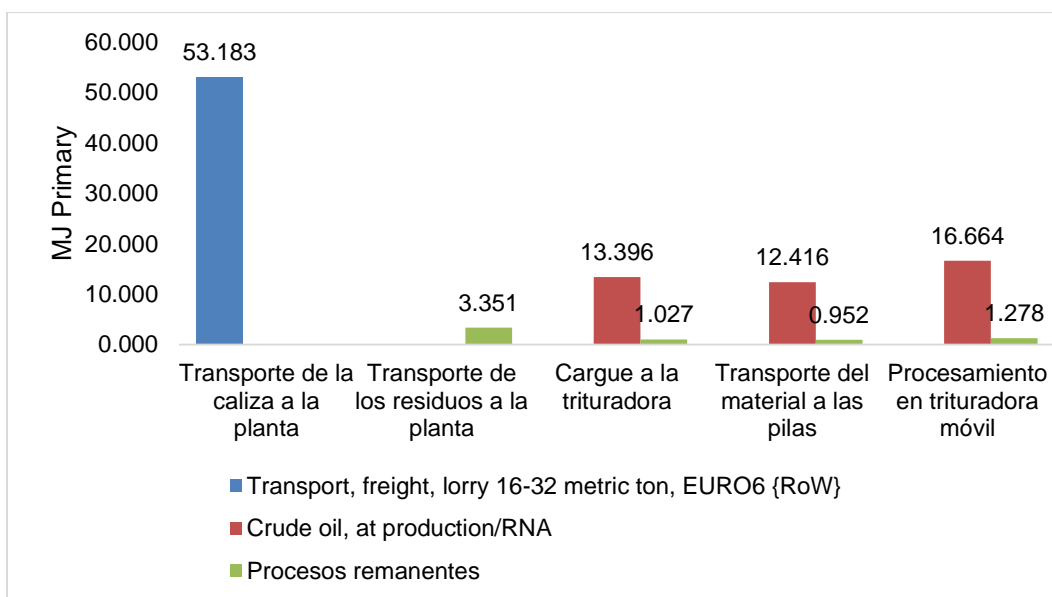


Figura 8: Análisis de contribución para la categoría Calentamiento global en la producción de la combinación de agregado natural/reciclado

Finalmente, si comparamos las dos cadenas de producción como un panorama (por lo explicado anteriormente), se puede observar que la de naturales/reciclados presenta menores repercusiones ambientales a nuestro entorno. Siendo que los naturales representan un alto riesgo para la salud humana y el cambio climático.

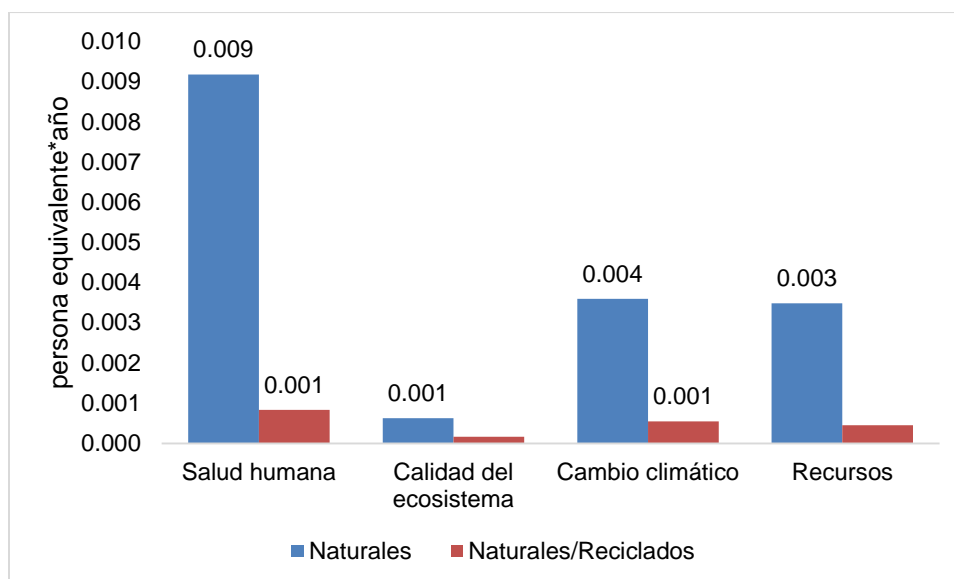


Figura 9: Resultados normalizados de las categorías de daño en la producción de agregados naturales y naturales/reciclados

6.2 Interpretación-Análisis de Sensibilidad

Dos criterios son utilizados generalmente para realizar un análisis de sensibilidad confiable en un estudio de análisis del ciclo de vida: (1) analizar el efecto de la variación de algunos parámetros y/o (2) definir un número de escenarios alternativos al escenario base (Rosado et al., 2017). De acuerdo al análisis realizado anteriormente, se observa que la distancia para el transporte de la piedra caliza hacia la planta es un parámetro relevante para determinar la carga ambiental global, es por ello, que se realizó un análisis de sensibilidad variando este parámetro en el ciclo de vida de la combinación de agregados naturales/reciclados hasta que se igualaran los impactos ambientales de los agregados naturales, los cuales no se modificaron. Las **Figura 10** y **Figura 11** muestran los resultados para las categorías de impacto de calentamiento global y energía no renovable normalizados, y en ellos se evidencia que para al menos igualar el comportamiento ambiental con respecto a los naturales (lo cual es sólo para plantear un escenario, ya que no puede haber una comparación directa) se necesita que la distancia de transporte de la caliza a la planta sea de más de 205 y 195 tkm respectivamente. Sólo estas dos categorías lograron igualar los impactos de los naturales, debido que son la más afectadas por los cambios en la distancia en cuanto al consumo de combustible.

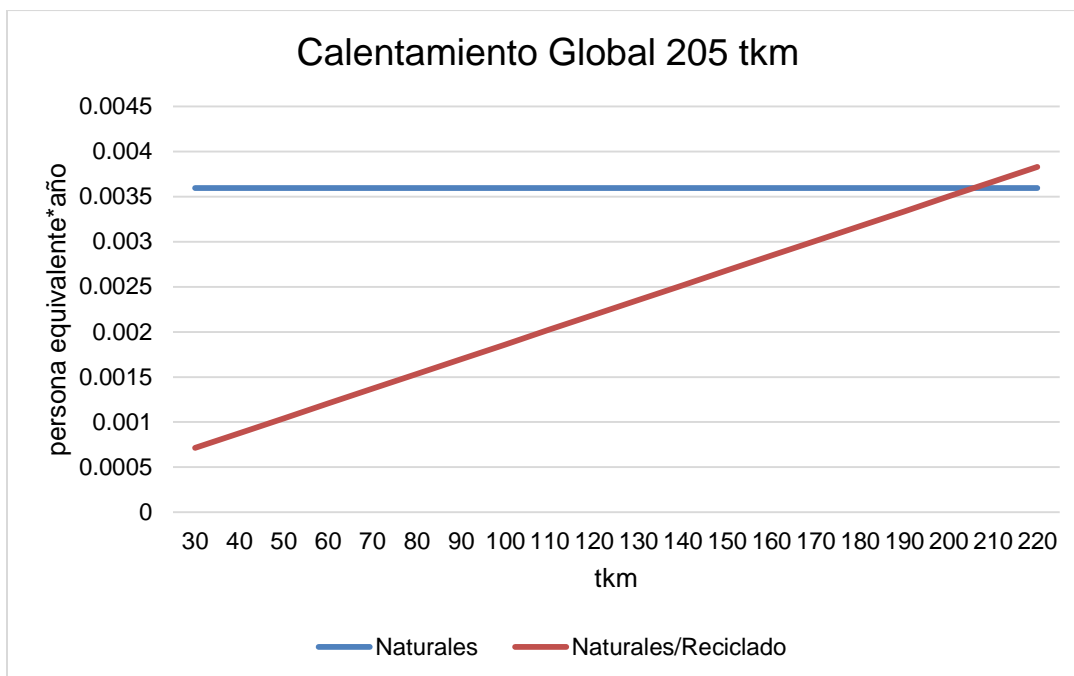


Figura 10: Relación entre la distancia de transporte de la caliza a la planta en la producción de agregados natural/reciclado y la categoría de impacto calentamiento global normalizada

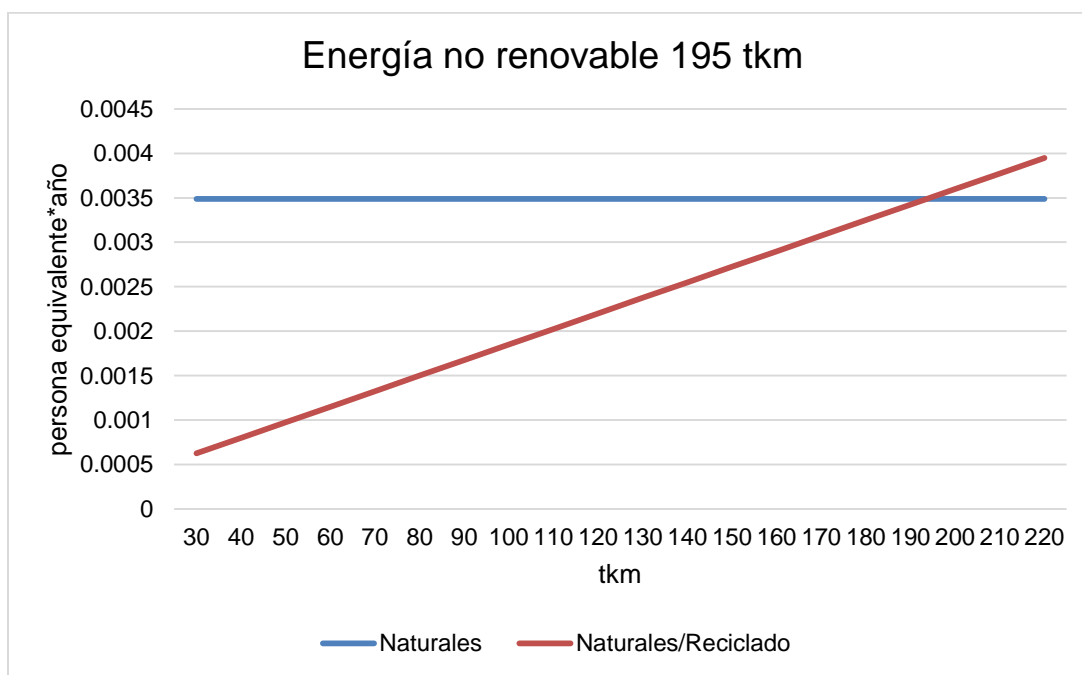


Figura 11: Relación entre la distancia de transporte de la caliza a la planta en la producción de agregados natural/reciclado y la categoría de impacto energía no renovable normalizada

7. CONCLUSIONES

En Colombia y en particular en el Departamento del Atlántico, el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición de concreto, al ser los de mayor proporción (Pacheco Bustos et al., 2017), es aún muy bajo, por lo que realizar una comparación de los impactos ambientales surgidos de la producción de agregados naturales vs reciclados implica un gran desafío debido a la nula información de primera mano con la que se cuenta, al no existir empresas formales que produzcan continuamente este tipo de producto reciclado. Sin embargo, el interés por estos agregados ha ido aumentando, ya que existe una necesidad de reutilización de todos los residuos que se están generando en la ciudad de Barranquilla por las obras de reconstrucción de vías y escenarios deportivos, así como la gran expectativa de la demolición del antiguo puente Pumarejo.

Igualmente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible a través de la resolución 472 del 2017 reglamentó la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición (RCD) en el país, con la finalidad de organizar y reincorporar estos residuos a nuevos procesos productivos y con ello contribuir a la disminución de la extracción de recurso no renovable, así como aumentar la vida útil de los vertederos al ceder el espacio que antes ocupaban los RCD.

De acuerdo a la revisión del estado del arte, en Colombia no existe ninguna investigación relacionada con la identificación y evaluación de los impactos ambientales de la producción de agregado natural ni reciclado a través de un análisis del ciclo de vida. En la literatura sólo se encuentran algunos estudios similares que en su mayoría se realizaron en los últimos años en Europa o Asia.

Es por ello que esta investigación tuvo como objetivo, determinar los impactos ambientales de la producción de agregado grueso natural ajustadas a las condiciones locales y de la región, así como establecer un escenario posible de comparación y discusión con la combinación de agregado natural con reciclado. Como resultado del análisis se concluye principalmente que el consumo del combustible diésel es el mayor contribuyente en términos ambientales en ambos procesos de producción, variando las etapas y la maquinaria que se utiliza, pero siendo este el principal protagonista y responsable del impacto negativo en las categorías de respiratorios inorgánicos, calentamiento global y energía no renovable según la metodología IMPACT 2002+.

Para el caso de los agregados naturales, el consumo de combustible del martillo hidráulico y la retroexcavadora representaron los mayores porcentajes de contribución en las categorías de respiratorio inorgánicos (89%), energía no renovable (89%) y calentamiento global (84%). Por el contrario, para la combinación de agregado natural con reciclado, la mayor carga ambiental estuvo representada por el transporte de la caliza hacia la planta en las mismas tres categorías, debido que la distancia era mucho mayor que la del agregado natural. Los resultados anteriores permiten concluir que los kilómetros recorridos, son un parámetro y aspecto relevante en la carga ambiental para la producción de agregados reciclados, coincidiendo con Simion et al., 2013; Hossain et al., 2016; Rosado et al., 2017; Faleschini et al., 2016; Marinković et al., 2010.

Debido a la importancia antes mencionada de la distancia del recorrido del material hacia la planta, se realizó un análisis de sensibilidad que permitió inferir que la producción de agregado natural combinado con reciclado es una opción viable en términos ambientales, siempre y cuando las distancias de transporte de la materia prima no superen los 200 km.

A partir de esta evaluación, las empresas del sector de agregados, pueden implementar acciones para buscar una reducción en sus emisiones de CO₂ y PM_{2.5} principalmente, a través de la adquisición de equipos y vehículos híbridos o eléctricos que no sólo funcionen con diésel, o con la utilización de filtros para el control y eliminación del material particulado, principal causa de enfermedades respiratorias en el mundo.

Por otro lado, los obstáculos más importantes de la investigación se presentaron en la recopilación de la información, ya que la disponibilidad de los datos estaba limitada por el nivel de acceso a ellos, así como de los métodos de trabajo de la empresa y la forma en como esta estaba organizada. Asimismo, es importante destacar que gran parte de la información contenida en las bases de datos de los softwares provienen de información basada y ajustada a las actividades desarrolladas en los países de Europa, lo cual dificulta y sesga el análisis y aplicación de estas bases de datos en zonas con características diferentes al viejo continente.

Adicionalmente, se presenta la necesidad de estandarizar el marco del análisis del ciclo de vida principalmente en la subjetividad que existe para la selección de las fronteras del sistema y la incertidumbre de los datos utilizados, con el fin de poder comparar los resultados de diferentes casos de estudio. También es importante tener en cuenta cómo integrar factores tales como la ubicación en zonas montañosas o llanas y las características generales de la red de carreteras, las condiciones meteorológicas, la población, y aspectos socioculturales)

Finalmente, para investigaciones futuras se recomienda establecer una comparación directa para agregados que cuenten con la misma calidad y uso, así como establecer la viabilidad no sólo ambiental sino económica y social de este tipo de producto, con el propósito de atraer inversionistas que apuesten por la generación de empleo y la sostenibilidad ambiental.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Assefa, G., Ambler, C., 2017. To demolish or not to demolish: Life cycle consideration of repurposing buildings. *Sustain. Cities Soc.* 28, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.011>
- Blankendaal, T., Schuur, P., Voordijk, H., 2014. Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: A scenario approach. *J. Clean. Prod.* 66, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.012>
- Blengini, G.A., Garbarino, E., 2010. Resources and waste management in Turin (Italy): The role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *J. Clean. Prod.* 18, 1021–1030. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.027>
- Braga, A.M., Silvestre, J.D., de Brito, J., 2017. Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *J. Clean. Prod.* 162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.057>
- Butera, S., Christensen, T.H., Astrup, T.F., 2015. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. *Waste Manag.* 44, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.011>
- Chen, X., Lu, W., 2017. Identifying factors influencing demolition waste generation in Hong Kong. *J. Clean. Prod.* 141, 799–811. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.164>
- Coelho, A., de Brito, J., 2013. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part II: Environmental sensitivity analysis. *Waste Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.004>
- Ding, T., Xiao, J., Tam, V.W.Y., 2016. A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China. *Waste Manag.* 56, 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.031>
- Estanqueiro, B., Dinis Silvestre, J., de Brito, J., Duarte Pinheiro, M., 2016. Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1197161>
- Faleschini, F., Zanini, M.A., Pellegrino, C., Pasinato, S., 2016. Sustainable management and supply of natural and recycled aggregates in a medium-size integrated plant. *Waste Manag.* 49, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.013>
- Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S., 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. *J. Environ. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Gan, V.J.L., Cheng, J.C.P., Lo, I.M.C., 2016. Integrating life cycle assessment and multi-objective optimization for economical and environmentally sustainable supply of aggregate. *J. Clean. Prod.* 113, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.092>
- Hossain, M.U., Poon, C.S., Lo, I.M.C., Cheng, J.C.P., 2016. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resour. Conserv. Recycl.* 109, 67–77.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009>

- Jaime, B.H., Fernando, J., Mahecha, A., Johanna, S., Rolón, L., 2013. Cadena De Petroleo 2013. Upme 111.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., Rosenbaum, R., 2003. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 8, 324–330.
- Khasreen, M.M., Banfill, P.F.G., Menzies, G.F., 2009. Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: A review. *Sustainability* 1, 674–701. <https://doi.org/10.3390/su1030674>
- López Gayarre, F., González Pérez, J., López-Colina Pérez, C., Serrano López, M., Martí, L., Nez, A., 2016. Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates. *J. Clean. Prod.* 113, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.093>
- Lu, W., Yuan, H., 2011. A framework for understanding waste management studies in construction. *Waste Manag.* 31, 1252–1260. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.018>
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., Ignjatović, I., 2010. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Manag.* 30, 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>
- Pacheco Bustos, C.A., Fuentes Pumarejo, L.G., Sánchez Cotte, É.H., Rondón Quintana, H.A., 2017. Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de barranquilla desde su modelo de gestión. *Constr. demolition waste (CDW), a Perspect. Achiev. thecity Barranquilla since itsmanagement Model.* 35, 533–555.
- Rosado, L.P., Vitale, P., Penteado, C.S.G., Arena, U., 2017. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. *J. Clean. Prod.* 151, 634–642. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.068>
- Serres, N., Braymand, S., Feugeas, F., 2016. Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment. *J. Build. Eng.* 5, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2015.11.004>
- Seto, K.E., Panesar, D.K., Churchill, C.J., 2017. Criteria for the evaluation of life cycle assessment software packages and life cycle inventory data with application to concrete. *Int. J. Life Cycle Assess.* <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1060-6>
- Silva, R. V., de Brito, J., Dhir, R.K., 2017. Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.070>
- Simion, I.M., Fortuna, M.E., Bonoli, Alessandra, Gavrilescu, M., 2013. Comparing environmental impacts of natural inert and recycled construction and demolition waste processing using LCA. *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.* 21, 273–287.
- Tam, V.W.Y., 2008. On the effectiveness in implementing a waste-management-plan method in construction. *Waste Manag.* 28, 1072–1080.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.04.007>

- Tošić, N., Marinković, S., Dašić, T., Stanić, M., 2015. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *J. Clean. Prod.* 87, 766–776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.070>
- Turk, J., Cotic, Z., Mladenovic, A., Šajna, A., 2015. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>
- Van Den Heede, P., De Belie, N., 2012. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cem. Concr. Compos.* <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>
- Vieira, D.R., Calmon, J.L., Coelho, F.Z., 2016. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* 124, 656–666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>
- Wang, S., Xu, Z., Zhang, W., Fan, Z., Feng, S., Liu, Y., 2017. Effects of aggregate reuse for overpass reconstruction-extension projects on energy conservation and greenhouse gas reduction: A case study from Shanghai City. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.007>
- Yan, H., Shen, Q., Fan, L.C.H., Wang, Y., Zhang, L., 2010. Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. *Build. Environ.* 45, 949–955. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.014>
- Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., Aranda Usón, A., 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build. Environ.* 46, 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>

9. ANEXOS

9.1 ANEXO A:

Cuestionario para la recopilación de la información acerca del proceso de producción de agregados convencionales

1. Datos generales de la empresa

- Nombre:
- Año de fundación:
- Número de empleados:
- Área total:
- Anterior a la construcción de la planta, cuál era el uso del terreno:

- N° de horas de trabajo al día:
- N° de días de trabajo a la semana:

2. Producción de agregados pétreos convencionales

- Capacidad de producción anual (ton/año):
- Capacidad de producción diaria (ton/día):
- Tipo de agregado pétreo producido: (Ej: 1"/, 1/2")

- Uso del agregado:

3. Proceso de producción

- **Extracción:** Favor describir el proceso de extracción de la roca hasta que es cargado a los camiones para el transporte hacia la planta.

- Nombre de la roca que se extrae:
- Cuanta roca se necesita para producir una cantidad determinada de agregado?

En caso de utilizarse explosivos.

- Qué tipo de explosivos utilizan?
- Cuanto de explosivo utilizan? (Ej: 200 g/ton de roca extraída)

Equipos y maquinaria utilizada en la mina: (Favor completar la siguiente tabla)

Maquinaria	Marca	Capacidad de producción	Tipo de Combustible	Consumo de combustible	Tipo de lubricante	Consumo de lubricante
Ej: Bulldozer	CAT D8T	180 ton/h	Diesel	10 litros/h	Grasa	0.205 kg/h

Si hay consumo de agua en la mina, favor indicar lo siguiente:

- Consumo de Agua (litros/día):
- De dónde proviene el agua utilizada en el proceso:
- **Transporte hacia la planta:**
 - El tipo de vehículo utilizado:
 - La capacidad del vehículo en toneladas:
 - La distancia en Km de la mina hacia la planta:
 - Favor indicar cómo se recibe, almacena y transporta hacia la tolva de alimentación el material extraído. Se realiza directamente desde el vehículo en el que llegan a la planta? Si no es así, complete la siguiente tabla:

Equipos utilizados para el manejo, cargue y transporte del material hacia la tolva

Equipo	Modelo	Capacidad Promedio de Producción	Cantidad	Potencia (kW)
--------	--------	----------------------------------	----------	---------------

de alimentación: (Favor completar la siguiente tabla)

Maquinaria	Marca	Capacidad de producción	Tipo de Combustible	Consumo de combustible	Tipo de lubricante	Consumo de lubricante
Ej: Bulldozer	CAT D8T	180 ton/h	Diesel	10 litros/h	Grasa	0.205 kg/h

- **Procesamiento:** Favor completar la tabla de los equipos utilizados en el procesamiento del material extraído para producir agregados.

Ej: Trituradora de Mandíbula		Ton/h		

- **Bandas transportadoras**

Favor indicar si todas las bandas transportadoras son iguales, del mismo tamaño y con cuantos motores funciona cada una.

- N° de bandas transportadoras por cada tipo:
- Marca del motor para cada tipo de banda:
-

Si hay consumo de agua en la planta, favor indicar lo siguiente:

- Consumo de Agua (litros/día):
- De dónde proviene el agua utilizada en el proceso:
- Existe reutilización del agua?

- **Consumo de lubricantes. Favor completar la siguiente tabla para aquellos equipos de la etapa de procesamiento que requieren lubricantes.**

Equipo	Tipo de Lubricante	N° de compartimientos	Capacidad del Compartimiento	Tiempo de reemplazo
Ej: Trituradora		2	600 L	2000 horas

de cono				

Residuos: Para este caso se tienen en cuenta todo material que no es útil para el procesamiento (por ejemplo: arena, madera, acero).

- Durante el proceso hay desperdicios? Si es positiva la respuesta, favor completar la siguiente tabla.

Etapas	Tipo de Material	Cantidad	Qué hacen con el residuo
Ej: Separación			Vertedero

9.2 ANEXO B:

Cuestionario para la recopilación de la información acerca del proceso de producción de agregados pétreo reciclado proveniente de residuos de concreto

4. Datos generales de la empresa

- Nombre:
- Año de fundación:
- Número de empleados:
- Área total:
- Anterior a la construcción de la planta, cuál era el uso del terreno:

- N° de horas de trabajo al día:
- N° de días de trabajo a la semana:

5. Producción de agregados pétreos reciclados

- Capacidad de producción anual (ton/año):
- Capacidad de producción diaria (ton/día):
- Tipo de agregado pétreo reciclado producido: (Ej: 1"/, 1/2")
- Uso del agregado:

6. Proceso de producción

Favor describir el proceso de producción del agregado reciclado desde el momento en que llega a la planta el residuo de concreto.

El transporte de los residuos de concreto a la planta de producción es por cuenta de la empresa?

- El tipo de vehículo utilizado:
- La capacidad del vehículo en toneladas:
- La distancia en Km hacia la planta de producción del lugar donde se encuentran los residuos:

Favor indicar cómo se recibe, almacena y transporta hacia la tolva de alimentación los residuos. Se realiza directamente desde el vehículo en el que llegan a la empresa? Si no es así, complete la siguiente tabla:

Equipos utilizados para el manejo, cargue y transporte de los residuos de concreto hacia la tolva de alimentación: (Favor completar la siguiente tabla)

Maquinaria	Marca	Capacidad de producción	Tipo de Combustible	Consumo de combustible	Tipo de lubricante	Consumo de lubricante
Ej: Bulldozer	CAT D8T	180 ton/h	Diesel	10 litros/h	Grasa	0.205 kg/h

Equipo	Modelo	Capacidad Promedio de Producción	Cantidad	Potencia (kW)
--------	--------	----------------------------------	----------	---------------

- **Procesamiento:** Favor completar la tabla de los equipos utilizados en el procesamiento de los residuos de concreto para producir agregados.

Ej: Trituradora de Mandíbula		Ton/h		

- **Bandas transportadoras**

Favor indicar si todas las bandas transportadoras son iguales, del mismo tamaño y con cuantos motores funciona cada una.

- N° de bandas transportadoras por cada tipo:
- Marca del motor para cada tipo de banda:

Si hay consumo de agua, favor indicar lo siguiente:

- Consumo de Agua (litros/día):
- De dónde proviene el agua utilizada en el proceso:

Residuos: Para este caso se tienen en cuenta todo material que no es útil para el procesamiento (por ejemplo: arena, madera, acero).

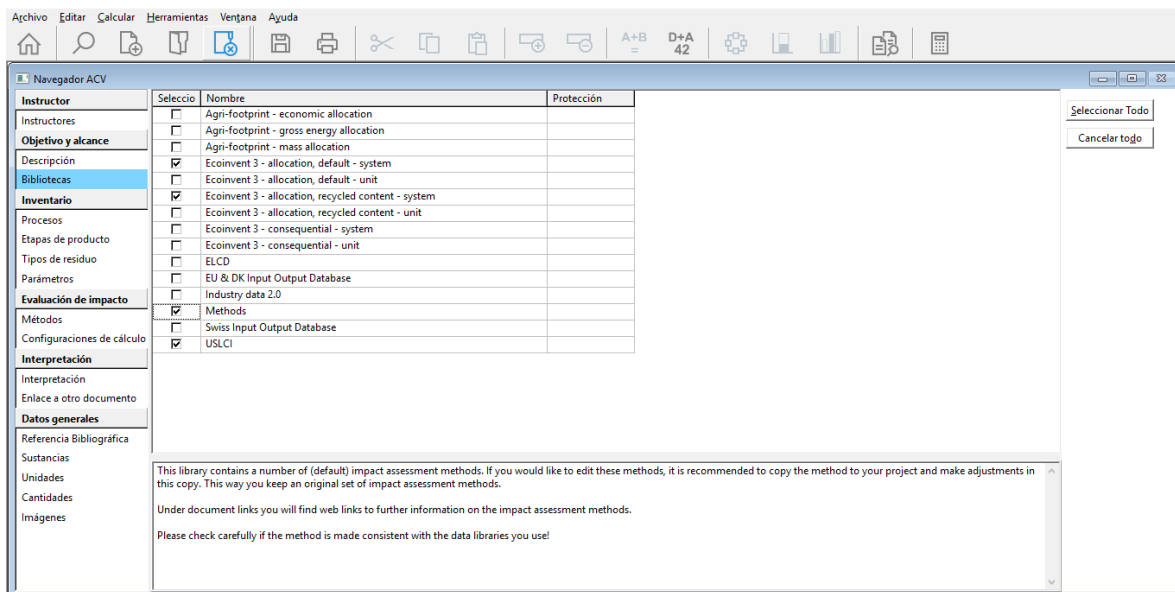
- Durante el proceso hay desperdicios? ¿En qué etapas?
- ¿De qué material?
- ¿Cuánto?
- ¿Qué hacen con los residuos?

9.3 ANEXO C

Ingreso de la información al software SimaPro



Crear un nuevo proyecto y seleccionar las bases de datos que se desean utilizar para el análisis. En este caso sólo se utilizaron datos de Ecoinvent v.3 y US LCI.



Agregado natural

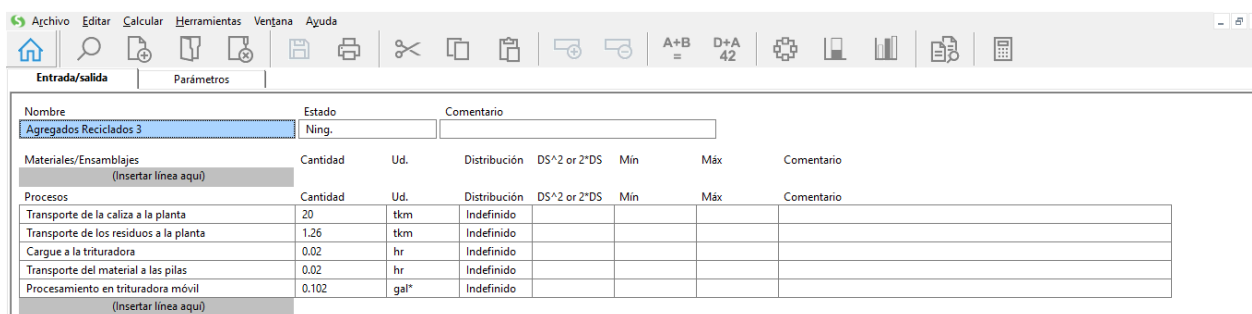
Para la producción de agregado natural, se procedió a crear un nuevo ensamblaje en el que se relacionaran según el flujo del proceso todas las actividades.

En el proceso de caliza extraída se ingresaron los datos de cuantas toneladas de piedra se requieren para producir una tonelada de agregado, así como el consumo de combustible y de lubricantes del martillo hidráulico, y lo referente a la ocupación de la tierra de acuerdo a la extensión de la cantera.

Para el procesamiento se utiliza el proceso de ecoinvent v3 Electricity, high voltage (PE), production mix, correspondiente a Perú, debido que las proporciones de las fuentes de energía son las más similares a las de Colombia, sólo varía un poco en la proporción del gas natural en lugar de carbón. Pero la principal que es hidroeléctrica es aproximadamente del 70%.

Agregado natural/reciclado

Para la producción de agregado natural/reciclado, se procedió a crear un nuevo ensamblaje en el que se relacionaran según el flujo del proceso todas las actividades.



The screenshot shows the Ecoinvent software interface. The 'Entrada/salida' (Input/output) tab is active, displaying a table for the assembly 'Agregados Recicladados 3'. The table is divided into two main sections: 'Materiales/Ensamblajes' (Materials/Assemblies) and 'Procesos' (Processes). The 'Materiales/Ensamblajes' section has one row with a quantity of 20 tkm. The 'Procesos' section has four rows with quantities of 1.26 tkm, 0.02 hr, 0.02 hr, and 0.102 gal* respectively. The table also includes columns for 'Ud.' (Unit), 'Distribución' (Distribution), 'DS^2 or 2^DS', 'Min', 'Máx', and 'Comentario' (Comment).

Nombre	Estado	Comentario
Agregados Recicladados 3	Ning.	

Materiales/Ensamblajes (Insertar línea aquí)	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	Comentario
Transporte de la caliza a la planta	20	tkm	Indefinido				
Transporte de los residuos a la planta	1.26	tkm	Indefinido				
Cargue a la trituradora	0.02	hr	Indefinido				
Transporte del material a las pilas	0.02	hr	Indefinido				
Procesamiento en trituradora móvil	0.102	gal*	Indefinido				

Procesos	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	Comentario
Transporte de la caliza a la planta	20	tkm	Indefinido				
Transporte de los residuos a la planta	1.26	tkm	Indefinido				
Cargue a la trituradora	0.02	hr	Indefinido				
Transporte del material a las pilas	0.02	hr	Indefinido				
Procesamiento en trituradora móvil	0.102	gal*	Indefinido				

Para el transporte de la caliza y de los residuos a la planta, al igual que en naturales se utiliza el proceso Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 6 (RoW).

De igual manera para el cargue del material a la trituradora y el transporte del agregado a las pilas se utiliza el proceso Loader operation, large, NE-NC/RNA, ingresando el consumo de combustible solamente, la que no se obtuvo información del empleo de lubricantes.

Para el procesamiento en triturador móvil se utiliza el proceso de Diesel, combusted in industrial equipment/US.

Con respecto a los impactos evitados por la utilización de residuos de concreto se utiliza el proceso de Inert waste, for final disposal (RoW), treatment of inert waste, inert material landfill.